



**Ana Vanessa
Guindeira dos Santos**

**Implementação de FBGs para sistemas de
comunicação em fibra óptica**



**Ana Vanessa
Guindeira dos Santos**

**Implementação de FBGs para sistemas de
comunicação em fibra óptica**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestrado Integrado em Engenharia Electrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Professor Mário Lima, Professor Auxiliar convidado do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro e do Doutor Rogério Nogueira, Investigador Auxiliar do Instituto de Telecomunicações

O júri

presidente

Doutor José Rodrigues Ferreira da Rocha
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

Doutor Mário José Neves de Lima
Professor Auxiliar Convidado da Universidade de Aveiro

Doutor Rogério Nunes Nogueira
Investigador Auxiliar do Instituto de Telecomunicações

Doutor Daniel Diogo Ferrão da Trindade Fonseca
NSN – Nokia Siemens Network

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao Doutor Rogério Nogueira e ao Professor Mário José Neves de Lima pela orientação e total disponibilidade ao longo de todo o projecto.

Gostaria de agradecer ao Miguel Drummond pela disponibilidade demonstrada no esclarecimento de dúvidas e pela orientação prestada em determinada altura do projecto.

Agradeço ao Carlos Marques pela gravação das redes e ajuda na compreensão das mesmas.

Gostaria de agradecer aos meus amigos, colegas de faculdade, que foram um grande suporte em todo este caminho.

Ao Nuno, por todos estes anos de apoio diário e pela paciência demonstrada, um muito obrigado.

Finalmente aos meus pais e irmã que sempre me apoiaram e acreditaram em mim.

Palavras-chave

Redes de Bragg em fibra, sistema de gravação, *stitching*, *software* de suporte à implementação, envolvente de apodização, *phase shift*, *steps*.

Resumo

O presente trabalho tem por objectivo o desenvolvimento de um algoritmo de apoio à gravação de redes de Bragg em fibra óptica, baseado no método de *stitching*, por sobreposição e interferência de secções de perturbação do índice de refração com um comprimento (*step*) definido.

Começou por se efectuar uma abordagem teórica ao funcionamento das redes de Bragg, identificando-se os principais parâmetros físicos da perturbação referida, que têm impacto na sua resposta em amplitude e fase.

Posteriormente, analisou-se o sistema implementado para a gravação de redes de Bragg, e desenvolveu-se um algoritmo de apoio a essa gravação.

Finalmente, para um perfil de apodização definido, procedeu-se à gravação de redes de Bragg com diferentes *steps*, suportada pelo *software* implementado, e compararam-se as respostas medidas e simuladas em cada caso. Analisou-se também, por simulação, o impacto do *step* e resposta correspondente no desempenho de um sistema de comunicações ópticas.

Keywords

Fiber Bragg Gratings, recording system, stitching, software to support the implementation, apodization envelope, phase shift, steps.

Abstract

This work focuses on the development of an algorithm to support a Bragg gratings' recording system, based on the stitching method, by overlapping sections of perturbed refraction index with a defined length (step).

First, we made a theoretical approach to the operation of Bragg gratings, identifying the main physical parameters of the referred perturbation that impact their response, both in amplitude and phase.

Subsequently, we analyzed the implemented system, and developed an algorithm to support it.

Finally, for a defined profile of apodization, we proceeded to the Bragg filters implementation, with different recording steps, supported by the developed software, and compared to the measured and simulated responses in each case. Finally, we simulated an optical communications system and analyzed the impact of the recording step and consequent response in the system's performance.

Glossário de acrónimos

CFBG	Chirped Fiber Bragg Grating	Redes <i>chirped</i>
FBG	Fiber Bragg Grating	Rede de Bragg em fibra óptica
FF	Formatador Filter	Filtro Formatador
FPBx	Low-pass Filter	Filtro passa-baixo
FWHM	Full Width at Half Maximum	Largura a meia altura
MZI	Mach-Zehnder Interferometer	Mach-Zehnder Interferómetro (modulador electroóptico)
NRZ	Non Return Zero	Não retorna a zero
PIN	Positive – Intrinsic- Negative	Positivo – Intrínseco – Negativo (fotodíodo)
PRBS	Pseudo Random Bit Sequence	Sequência de bits pseudo -aleatória
UV	Ultraviolet	Ultravioleta
WDM	Wavelength Division Multiplexing	Multiplexagem no comprimento de onda

Lista de símbolos

$A_p(z)$	Função de apodização (FBG)
A_k^+	Campo propagante na secção de índice κ (método da matriz de transferência)
B_k^+	Campo contrapropagante na secção de índice κ (método da matriz de transferência)
D	Dispersão da fibra
G	Ganho EDFA
L	Comprimento da rede de Bragg
L_k	Comprimento da secção de índice κ da FBG (método da matriz de transferência)
M	Número de secções (método da matriz de transferência)
m	Ordem de difracção
N_F	Figura de ruído do EDFA
n	Índice de refacção
n_{eff}	Índice de refacção efectivo do núcleo da fibra
n_i	Índice de refacção no meio da onda incidente
n_m	Índice de refacção no meio da onda difractada
$\overline{n_{eff}}$	Valor médio do índice de refacção efectivo numa FBG
Q	Factor de qualidade
R_F	Coeficiente de reflexão (Fresnel)
$Step(s)$	Equivalente à abertura do <i>slit</i> ; Escolhido pelo utilizador
$Step_{round}$	Arredondamento do <i>Step</i> ao valor mais próximo, múltiplo do período
$step(s)$	Valor(es) do deslocamento da carruagem de translação
T_k	Matriz de transferência da secção κ (método da matriz de transferência)
$v(z)$	Visibilidade (FBG)
V_F	Velocidade da fibra

V_{MF}	Velocidade da máscara de fase
δ	Parâmetro que relaciona o desfasamento entre o comprimento de onda de propagação e o comprimento de onda de Bragg quando $\overline{\delta n_{eff}} \rightarrow 0$
δn	Alteração / Transição de índice de refração
$\delta n_{eff}(z)$	Variação do índice de refração do modo guiado de uma fibra ao longo do eixo longitudinal (FBG)
$\overline{\delta n_{eff}}$	Variação do valor médio do índice de refração na FBG
Δn	Amplitude de modulação do índice de refração (FBG)
Δz	Desfasamento da carruagem de translação em <i>steps</i>
θ	Desfasamento da carruagem de translação em radianos
θ_b	Ângulo dos planos da perturbação do índice de refração (FBG inclinada)
θ_i	Ângulo da onda incidente
θ_m	Ângulo da onda difractada
κ_{DC}	Influência na propagação do valor médio do índice de refração na rede de Bragg
λ	Comprimento de onda
λ_{Bragg}	Comprimento de onda de Bragg
Λ	Período da perturbação induzida no índice de refração (FBG)
Λ_0	Período à entrada da rede (FBG aperiódica)
Λ_{MF}	Período das depressões da máscara de fase
$\hat{\sigma}$	Relacionado com δ e κ_{DC}
$\phi(z)$	Variação do período (FBG)
φ	Relacionado com κ e com $\hat{\sigma}$
ϕ	Valor do <i>phase shift</i> em radianos

Índice

O júri

Agradecimentos

Resumo

Abstract

Glossário de Acrónimos

Lista de símbolos

Índice

Capítulo 1- Introdução	1
1.1 – Motivação	1
1.2 – Objectivos	1
1.3 – Estrutura da dissertação	2
1.4 – Principais contribuições	3
Capítulo 2 - Redes de Bragg	5
2.1– Introdução.....	5
2.2 – Teoria e Propriedades das Redes de Bragg	5
2.3 – Tipos de Redes de Bragg	9
2.3.1 – Redes uniformes	9
2.3.2 – Redes apodizadas.....	10
2.3.3 – Redes aperiódicas.....	12
2.3.4 – Redes sinc	13
2.3.5 – Redes com deslocamento de fase.....	14
2.4 – Simulação de redes de Bragg.....	14
2.4.1 – Método da Matriz de Transferência	14
2.5 – Gravação de redes de Bragg em fibra óptica	17
2.5.1 – Introdução	17
2.5.2 – Técnicas experimentais de gravação	17
2.5.3 – Gravação por máscara de fase	18
2.5.4 – Gravação por interferómetro.....	19
2.5.4.1 – Interferómetro por divisão de amplitude	19
2.5.4.2 – Interferómetro com máscara de fase.....	20
2.5.5 – Gravação de redes longas	21

2.5.6 – Sistema de gravação implementado.....	23
Capítulo 3 – Algoritmo para implementação de FBGs pelo método de <i>stitching</i>....	25
3.1 – Introdução.....	25
3.2 – Princípios Básicos.....	26
3.3 – Determinação de <i>steps</i>	30
3.4 – <i>Auto-Detect Phase Shifts</i>	32
3.5 – Simulação de Envolventes	34
3.6 – Impacto do <i>Step</i> utilizado no desempenho da FBG	40
3.7 – Gravação de Envolventes	42
Capítulo 4 - Conclusões.....	47
Apêndice A – Ficheiro Help	51
Apêndice B - Simulador GOSiP.....	53
Apêndice C – Interface Gráfica	55
Bibliografia	61

Capítulo 1

Introdução

1.1 – Motivação

As redes de Bragg (FBG: *Fiber Bragg Gratings*), encontram actualmente, e desde o seu aparecimento, muitas aplicações no domínio das telecomunicações e sensores, devido às suas propriedades e quantidade de parâmetros controláveis.

Desde a descoberta e implantação das redes de Bragg no âmbito das comunicações ópticas, a sua implementação prática tem sido objecto de estudo e investigação, dada a dificuldade em controlar as diversas variáveis envolvidas. [1] Um ponto comum dessa investigação tem sido a optimização do sistema de gravação, para obter uma resposta da FBG implementada o mais próxima possível da ideal. Um foco importante dessa optimização é, comprovadamente, a automatização do sistema, que facilita a sistematização e controlo do mesmo.

A motivação para o trabalho desenvolvido no âmbito da dissertação surge neste contexto, de automatização e melhoria do controlo do sistema de gravação [2] existente no Instituto de Telecomunicações - Pólo de Aveiro.

1.2 – Objectivos

O objectivo central deste trabalho consiste em desenvolver um software de apoio ao sistema de gravação automático implementado, cuja entrada é um determinado perfil de envolvente (apodização) do formato da perturbação a gravar

e a saída, os *steps* do estágio de translação do sistema necessários a essa gravação.

Pretende-se também utilizar uma ferramenta de simulação da resposta (amplitude e fase) de FBGs, a partir da envolvente definida, que permita prever o impacto do método de gravação, nomeadamente do *Step* utilizado, na resposta obtida.

O objectivo final é concluir acerca do correcto desempenho do software criado, no fabrico de um conjunto de redes com um determinado perfil teórico, considerando diferentes *Steps*, por comparação das respostas, nomeadamente a ideal, a simulada e a gravada. As duas primeiras obtidas com a ferramenta de simulação e a resposta real medida experimentalmente.

1.3 – Estrutura da dissertação

O presente trabalho foi dividido em 4 capítulos onde são estudados diferentes aspectos relacionados com redes de Bragg.

Neste primeiro capítulo, para além da motivação em que se insere o trabalho, são também apresentados os principais objectivos, a estrutura do mesmo e as principais contribuições.

No segundo capítulo é feito um breve resumo da teoria das redes de Bragg, mais propriamente as suas propriedades, tipos de redes, simulação e gravação de redes de Bragg. Neste último apresenta-se o sistema de gravação implementado no Instituto de Telecomunicações – Pólo de Aveiro.

No terceiro capítulo apresenta-se o desenvolvimento do trabalho, descrevendo-se o algoritmo que permite a implementação no *setup* de gravação utilizado. Apresentam-se os princípios básicos que permitiram a determinação dos *steps* do estágio de translação para obtenção de um dado perfil da envolvente, e a detecção automática dos *phase shifts* (saltos de fase) a considerar. É também apresentada a simulação das envolventes utilizando uma ferramenta de

simulação bem como os resultados experimentais de algumas envolturas gravadas para comparação. Finalmente, analisa-se, por simulação, o impacto do *Step* de gravação na resposta obtida, e consequentemente no desempenho de um sistema de comunicações ópticas.

As considerações finais e trabalho futuro encontram-se no quarto capítulo.

1.4 – Principais contribuições

Na opinião do autor, as principais contribuições científicas do trabalho descrito nesta dissertação, podem resumir-se da seguinte forma:

- Projecto, implementação e desenvolvimento do software de apoio ao sistema de gravação de redes de Bragg em fibra óptica, com possibilidade de obter ficheiros de gravação para diferentes envolturas (capítulo 3).
- Desenvolvimento de uma técnica de obtenção automática de *phase shifts* (capítulo 3)
- Desenvolvimento de uma interface gráfica de fácil utilização.
- Publicação resultante: Ana Vanessa Santos, Rogério Nogueira and Mário Lima, Control algorithm for the production of FBG with the stitching method. *SEONs*, June 2008.

Capítulo 2

Redes de Bragg

2.1 – Introdução

As redes de Bragg (FBG: *Fiber Bragg Gratings*) possuem diversas aplicações devido às suas propriedades e variedade de parâmetros possíveis de controlar. Estas têm várias aplicações no domínio das telecomunicações. Permitem implementar filtros ópticos sintonizáveis, compensadores de dispersão, etc.

Neste capítulo apresenta-se um resumo da teoria das redes de Bragg. Este encontra-se subdividido em quatro partes: teoria e propriedades das redes de Bragg, tipos de redes de Bragg, simulação de redes de Bragg e gravação de redes de Bragg em fibra óptica.

2.2 – Teoria e Propriedades das Redes de Bragg

Uma rede de Bragg consiste numa secção de uma fibra óptica onde o índice de refração efectivo do núcleo foi alterado a intervalos periódicos, de forma que certos comprimentos de onda sejam transmitidos e outros reflectidos. Esta modulação periódica pode ser obtida através de diversos métodos utilizando radiação UV coerente, ou seja, emitida por um laser. A fotossensibilidade é o mecanismo físico responsável por esta variação.

Na figura 2.1 estão representados alguns dos parâmetros mais importantes numa rede de Bragg

n_{eff} representa o índice de refração efectivo do núcleo da fibra, Δn a amplitude de modulação do índice de refração $\overline{\delta n_{eff}}$ o valor médio do índice de refração da rede e Λ o período da perturbação induzida no índice de refração.

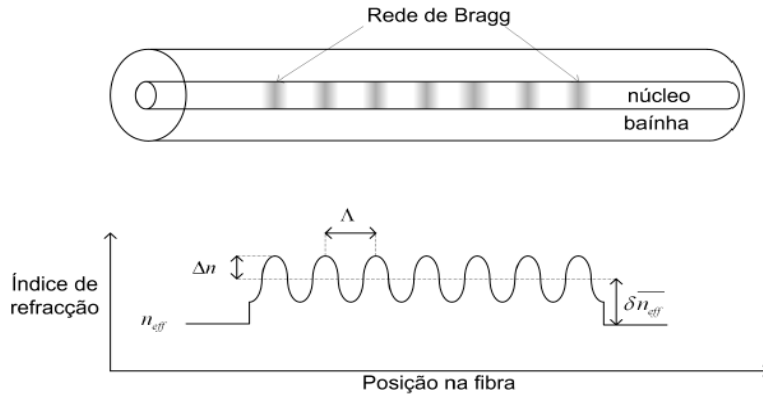


Figura 2.1- Representação da variação do índice de refração numa rede de Bragg em fibra óptica [3]

Recorrendo à reflexão de Fresnel, pode-se analisar, qualitativamente, o efeito da perturbação periódica do índice de refração. Quando uma onda electromagnética atravessa uma interface entre dois meios dieléctricos diferentes, ocorre reflexão de parte da sua energia. No caso de uma incidência normal, o coeficiente de reflexão R_F é dado por:

$$R_F = \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2} \quad (2.1)$$

onde n_1 e n_2 representam os índices de refração dos dois meios envolvidos. Considerando uma pequena transição do índice de refração, δn , obtém-se um coeficiente de reflexão dado por:

$$R_F = \left[\frac{n - (n + \delta n)}{n + (n + \delta n)} \right]^2 = \left[\frac{\delta n}{2n + \delta n} \right]^2 \quad (2.2)$$

Para $\delta n \approx 10^{-4}$ obtém-se $R_F \approx 10^{-9}$. Numa rede de Bragg existem milhares de transições destas. Assim, é possível ocorrer reflexão total caso cada contribuição das reflexões de Fresnel esteja em fase. As condições em que esta situação de acoplamento ocorre podem ser entendidas, de uma forma qualitativa, utilizando a teoria das redes de difracção em fibras ópticas. Para realizar um estudo quantitativo, é necessário recorrer à teoria dos modos acoplados [4].

Uma rede de difracção consiste numa estrutura de fase ou amplitude com dimensões extensas comparativamente com o período de modulação.

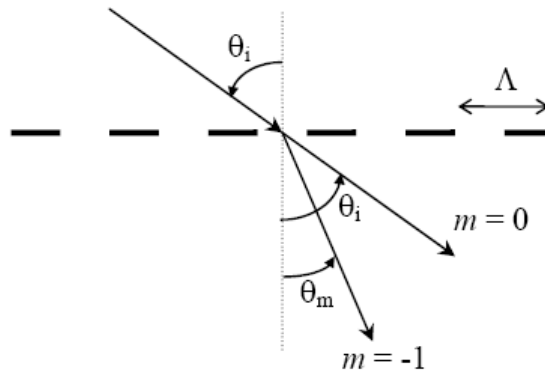


Figura 2.2- Difracção de uma onda electromagnética por uma rede de difracção [4]

Uma rede de difracção em fibra óptica obedece às mesmas leis que as redes de difracção em espaço livre. Desta forma, o comportamento de uma onda electromagnética que atravessa uma rede de difracção com um determinado ângulo de incidência θ_i , pode ser descrito pela equação das redes de difracção:

$$\Lambda(n_m \sin \theta_m - n_i \sin \theta_i) = m\lambda \quad (2.3)$$

onde θ_m é o ângulo da onda difractada, n_i e n_m são os índices de refacção dos meios das ondas incidente e refractada, respectivamente, m a ordem de difracção e λ o comprimento de onda da onda incidente. Esta expressão permite calcular apenas os ângulos θ_m onde ocorrem máximos de interferência construtiva.

Numa fibra monomodo, a propagação é efectuada perpendicularmente aos planos de índice constante da rede, pelo que se verifica a relação $\theta_i = -\theta_m = \pi/2$. Assim,

considerando uma difracção de primeira ordem, $m = -1$, a expressão anterior é simplificada para

$$\lambda_{Bragg} = 2n_{eff}\Lambda \quad (2.4)$$

Esta expressão é designada por Condição de Bragg.

O comprimento de onda de Bragg, λ_{Bragg} , é então dependente, não só do período da rede de difracção como também do índice de refracção efectivo associado ao modo guiado pela fibra, ou seja, dos índices de refracção do núcleo e da bainha. Desta forma λ_{Bragg} será também função de todas as grandezas físicas que possam alterar esses parâmetros interagindo na fibra óptica que contém a rede de difracção de Bragg.

A variação do índice de refracção do núcleo ao longo do eixo longitudinal pode ser descrita pela expressão

$$\delta n_{eff}(z) = \overline{\delta n_{eff}}(z) + A_p(z) \cdot f\left[\frac{\Lambda(z)}{\cos(\theta_b)}, z\right] \quad (2.5)$$

onde $\overline{\delta n_{eff}}(z)$ representa a variação do valor médio da modulação, $A_p(z)$ descreve a amplitude e o valor médio de modulação, ou seja, a apodização e $f\left[\frac{\Lambda(z)}{\cos(\theta_b)}, z\right]$ é a função que representa o perfil de modulação, onde $\Lambda(z)$ representa o período de modulação ao longo da rede, incluindo a aperiodicidade e θ_b é o ângulo no caso de uma rede de Bragg inclinada. Em termos de técnicas de gravação de redes de Bragg, grande parte recorrem a interferência óptica. Desta forma, a um maior tempo de exposição está associada uma maior variação da amplitude de modulação. Assim, $A_p(z)$ pode ser descrito como

$$A_p(z) = \overline{\delta n_{eff}}(z) \cdot v(z), \quad 0 \leq v(z) \leq 1 \quad (2.6)$$

onde $v(z)$ é a visibilidade das franjas de interferência e depende da qualidade de interferência óptica. A gravação de redes de Bragg por este método promove um perfil de modulação com características sinusoidais. Assim, pode-se escrever

$$\delta n_{eff}(z) = \overline{\delta n_{eff}}(z) \left\{ 1 + v(z) \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda} z + \phi(z) \right] \right\} \quad (2.7)$$

onde $\phi(z)$ descreve a variação do período ao longo da rede. Por esta equação pode-se verificar que a visibilidade não altera o valor médio do índice de refração, apenas altera a amplitude de variação deste.

Nesta expressão temos as seguintes variáveis $\overline{\delta n_{eff}}(z)$, $v(z)$ e $\phi(z)$. No entanto é possível variar outros parâmetros, como por exemplo o ângulo de gravação da rede ou mesmo a disposição espacial de várias redes. Desta forma obtém-se redes de Bragg com diferentes aplicações e propriedades.

2.3 – Tipos de Redes de Bragg

Nesta secção serão abordadas as características de vários tipos de redes de Bragg quanto às suas vantagens e desvantagens.

2.3.1 – Redes uniformes

Estas redes tratam-se das mais simples de todas. As propriedades espaciais mantêm-se constantes ao longo do eixo de propagação. Desta forma, $\overline{\delta n_{eff}}(z)$, $v(z)$ e $\phi(z)$ são constantes e independentes de z . Embora estes parâmetros sejam constantes, pode-se controlar a reflectividade e a largura de banda, variando a amplitude de modulação e o comprimento da rede. A simplicidade de gravação constitui uma vantagem deste tipo de redes, no entanto a presença de lóbulos laterais de elevadas amplitudes no espectro de reflexão é uma enorme desvantagem. Estes lóbulos aparecem devido às fronteiras abruptas entre as redes de Bragg e a própria fibra. Em termos de aplicações este tipo de redes não

são aconselháveis em sistemas WDM, uma vez que a resposta espectral dos lóbulos laterais traduz-se em efeitos de diafonia. Se o objectivo for implementar sensores simples estas redes já se tornam adequadas devido à sua simplicidade.

2.3.2 – Redes apodizadas

Os lóbulos laterais das redes uniformes podem ser substancialmente reduzidos se a amplitude de modulação do índice de refração, nas extremidades da rede, iniciar e terminar de uma forma gradual. Esta técnica designa-se por apodização. Considerando a expressão 2.7, o controlo da apodização é efectuado através da variação dos parâmetros $\overline{\delta n_{eff}}(z)$, $v(z)$. A desvantagem desta técnica reside na variação do valor médio da modulação, que resulta numa resposta espectral assimétrica. A apodização ideal consiste em manter constante o valor médio da modulação e variar apenas a visibilidade das franjas. Designa-se por compensação DC este tipo de apodização. Existem vários tipos de apodização. Os perfis mais comuns podem ser formulados do seguinte modo:

Perfil tangente hiperbólica:

$$A(z) = \frac{\tanh \left\{ P \left[1 - \left| \frac{z - L/2}{L} \right| \right] \right\}}{\tanh (P)} \quad (2.8)$$

Perfil seno:

$$A(z) = \sin \left(\frac{\pi z}{L} \right) \quad (2.9)$$

Perfil coseno-elevado:

$$A(z) = \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{\pi(z - L/2)}{FWHM} \right) \right] \quad (2.10)$$

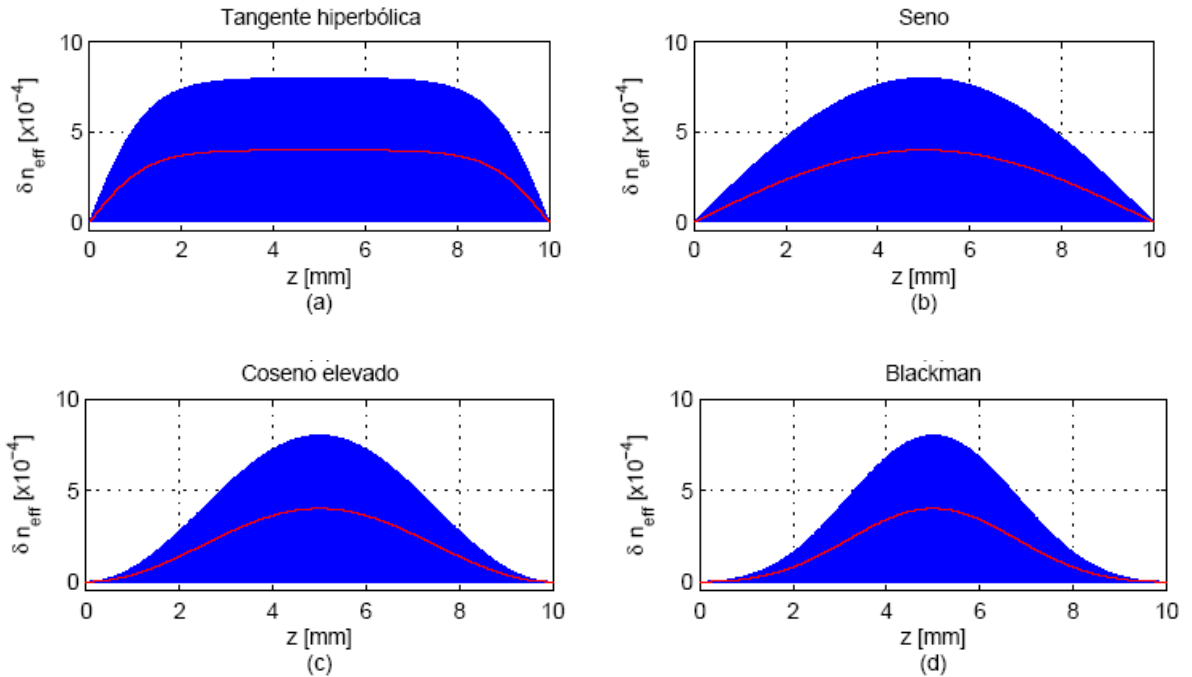
Perfil Blackman:

$$A(z) = \frac{1 + (1 + P) \cos\left(\frac{2\pi(z - L/2)}{L}\right) + P \cos\left(\frac{4\pi(z - L/2)}{L}\right)}{2(1 + P)} \quad (2.11)$$

Perfil gaussiano de ordem elevada:

$$A(z) = \exp\left\{-\left[2(\ln 2)^{1/P} \left(\frac{z - L/2}{FWHM}\right)\right]^P\right\} \quad (2.12)$$

L é o comprimento da rede, P um parâmetro a ajustar conforme o tipo de apodização que se pretende e $FWHM$ a largura total a meia altura do perfil de apodização. Os valores típicos de P são: $P = 4$ para o perfil tangente hiperbólica, $P = 0.19$ para o perfil Blackman, $P = 2$ para um perfil gaussiano de segunda ordem. O parâmetro $FWHM$ é geralmente truncado a L e a $L / 3$ para os perfis coseno-elevado e gaussiano, respectivamente. Na figura 2.3 encontram-se ilustrados os perfis de modulação acima enunciados.



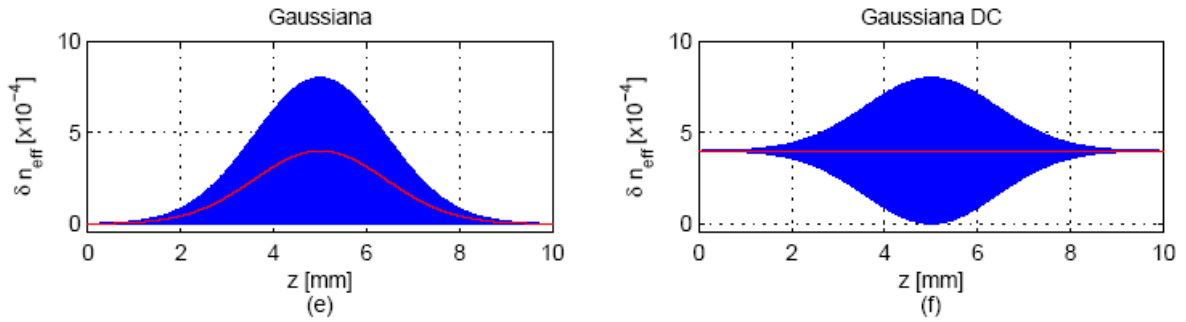


Figura 2.3- Ilustração de alguns perfis de apodização. A linha a vermelho representa o valor médio de modulação [3]

2.3.3 – Redes aperiódicas

Este tipo de redes também é conhecido por redes *chirped* (CFBG) e são assim conhecidas devido à variação da condição de ressonância ao longo do seu comprimento. Desta forma, diferentes comprimentos de onda do sinal incidente são reflectidos em diferentes posições da rede que permite um controlo da curva do atraso de grupo. As redes aperiódicas mais comuns consistem em redes com período de modulação variável ao longo da sua extensão longitudinal. O tipo de aperiodicidade é controlado pelo parâmetro $\phi(z)$ da expressão (2.7).

A aplicação de aperiodicidade traduz-se em mudanças do atraso de grupo e da largura de banda. Neste tipo de redes a condição de ressonância ocorre para vários comprimentos de onda, assim possuem geralmente uma largura de banda superior relativamente às redes periódicas. Por outro lado, o facto de diferentes comprimentos de onda serem reflectidos em diferentes posições da fibra, origina um atraso de grupo dependente do comprimento de onda. Se a aperiodicidade for linear, o atraso de grupo é também linear. Esta é a propriedade chave que torna este tipo de redes atractivas para implementar compensação de dispersão. O período numa rede aperiódica pode ser expresso por um polinómio de grau N dado por:

$$\Lambda(z) = \Lambda_0 + \Lambda_1 z^2 + \Lambda_2 z^3 + \dots + \Lambda_N z^N \quad (2.13)$$

com Λ_0 o período à entrada da rede. Existe ainda a possibilidade de alterar a condição de ressonância através da variação linear do valor médio do índice de

refracção ao longo do eixo z . No entanto, a gravação de redes aperiódicas de acordo com este método é mais difícil.

2.3.4 – Redes Sinc

Uma rede com perfil de visibilidade seno cardinal é também conhecida por sinc. Este perfil tem a seguinte expressão:

$$v(z) = \left| \text{sinc} \left(\frac{z - L/2}{T} \right) \right| \quad (2.14)$$

Na gravação de uma rede sinc, apenas um número limitado de lóbulos pode ser gravado. Obtém-se assim uma sinc truncada. A largura de banda do filtro pode ser controlada através do comprimento da rede e do número de zeros da função sinc. A uma maior largura de banda, corresponde um menor período, logo menor é o tamanho da rede. Desta forma, uma rede com elevada largura de banda tem um comprimento pequeno e uma variação do índice de refração elevada.

A vantagem deste tipo de redes é que o atraso de grupo permanece constante na banda de passagem. De forma a compensar a limitação do número de lóbulos pode-se apodizar o perfil sinc com um perfil gaussiano. Desta forma, a amplitude dos lóbulos laterais é reduzida no entanto, o decaimento das bandas de transição é menor. Este factor constitui uma desvantagem caso se pretenda um filtro o mais rectangular possível. Se se pretender um filtro de ordem menor, pode-se variar a apodização do perfil sinc até se obter a ordem pretendida. Tem-se agora uma rede com ordem flexível e com atraso de grupo quase ideal. A apodização do perfil sinc denomina-se *shading*. Com esta solução é possível desenhar uma rede gaussiana com sintonia, largura de banda e ordem pretendidas, desde que dentro dos limites do sistema de gravação. Obtém-se desta forma um filtro com características quase ideais, uma vez que a resposta de fase resulta num atraso de grupo praticamente constante. [3]

2.3.5 – Redes com deslocamento de fase

Nas redes de Bragg com deslocamento de fase a distância entre os extremos interiores é inferior ao período de modulação. Em termos espectrais, o deslocamento de fase na modulação do índice origina um filtro transmissivo na banda de rejeição da rede. O comprimento de onda desse filtro pode ser seleccionado através da posição na rede do salto de fase, do tipo de salto de fase induzido, ou de ambos.

As aplicações das redes de Bragg com deslocamento de fase são inúmeras, tais como: utilização como filtros transmissivos estreitos, interruptores ópticos ou na formatação de impulsos.

2.4 – Simulação de redes de Bragg

Nesta subsecção apresenta-se uma breve teoria por detrás do simulador da resposta espectral de redes de Bragg utilizado neste trabalho. No Apêndice B é descrito o simulador GOSiP desenvolvido por Miguel Vidal Drummond [3].

2.4.1 - Método da Matriz de Transferência

O método da matriz de transferência é uma forma elegante de determinar a função de transferência de uma rede não uniforme. O seu princípio de funcionamento consiste em dividir a rede de Bragg em secções longitudinais suficientemente pequenas para que cada secção possa ser considerada uma rede de Bragg uniforme. Deste modo é possível determinar a função transferência para cada uma das redes uniformes. A função de transferência de toda a rede é igual ao produto de todas as funções de transferência. Na figura 2.4 está representada uma rede de Bragg uniforme, dividida em M secções uniformes, de comprimento L , da qual consideremos uma secção k de comprimento L_k .

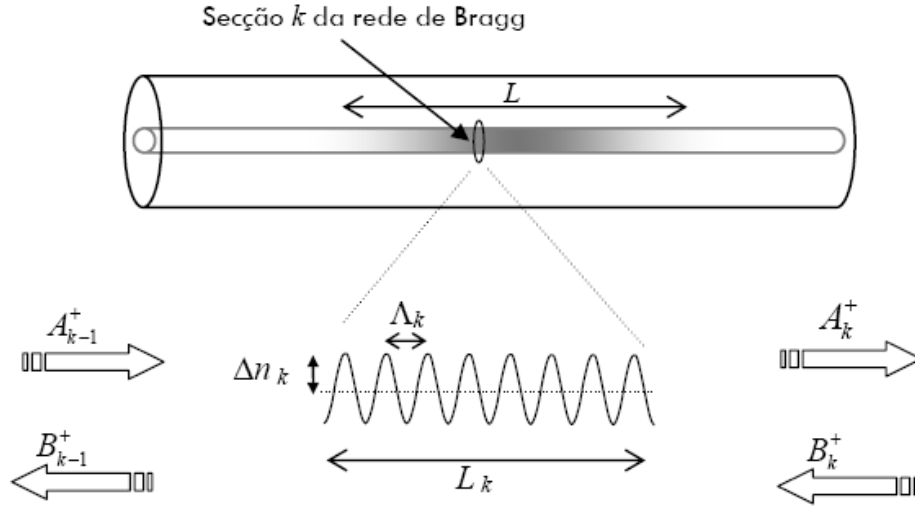


Figura 2.4 - Secção de uma rede de Bragg usada no método da matriz de transferência como um dispositivo com duas entradas e duas saídas. [4]

Cada uma destas secções pode ser considerada como um dispositivo de quatro portas, com entradas A_{k-1}^+ e B_k^+ e saídas B_{k-1}^+ e A_k^+ . Assim pode escrever-se:

$$\begin{bmatrix} A_{k-1}^+ \\ B_{k-1}^+ \end{bmatrix} = T_k \begin{bmatrix} A_k^+ \\ B_k^+ \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Onde T_k é a função de transferência da rede correspondendo à secção k . Considerando que não há absorção nem ganho, esta equação pode ser escrita em função das condições fronteira.

$$\begin{bmatrix} 1 \\ B_{k-1}^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_k^+ \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Os elementos da matriz T_k são

$$\begin{aligned} T_{11} &= \cosh(\varphi L_k) - i \frac{\hat{\sigma}}{\varphi} \sinh(\varphi L_k) \\ T_{12} &= -i \frac{\kappa}{\varphi} \sinh(\varphi L_k) \\ T_{21} &= T_{12}^* \\ T_{22} &= T_{11}^* \end{aligned} \quad (2.17)$$

Os coeficientes φ , κ e $\hat{\sigma}$ correspondem aos parâmetros locais da secção L_k . Conhecidas todas as funções de transferência das M secções, calcula-se a função de transferência de toda a rede, T ,

$$T = \prod_{k=1}^M T_k \quad (2.18)$$

Os coeficientes de reflexão, R , e de transmissão, T^r , podem ser calculados utilizando as condições fronteira definidas.

$$R = \left| \frac{T_{21}}{T_{11}} \right|^2 \quad (2.19)$$

$$T^r = \left| \frac{1}{T_{11}} \right|^2 \quad (2.20)$$

As equações permitem simular, por método matricial, redes de Bragg com qualquer tipo de apodização e aperiodicidade. Caso se pretenda simular redes de Bragg onde exista saltos de fase, usa-se uma matriz F entre as duas secções da rede onde ocorre o salto de fase. A matriz F é dada por

$$F = \begin{bmatrix} e^{\frac{-i\phi_f}{2}} & 0 \\ 0 & e^{\frac{i\phi_f}{2}} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

onde ϕ_f é o salto de fase correspondente.

É necessário ter em conta em que condições pode ser aplicado este método.

- As secções têm que ser suficientemente pequenas por forma a que a aproximação de rede uniforme seja válida. Por outro lado, a aproximação de uma rede uniforme exige que $L_k \gg \Lambda$, pelo que as dimensões de cada secção não podem ser demasiado pequenas.
- Cada secção deve ter um comprimento $L_k = N_k \Lambda$ onde N_k é um número natural. Esta condição permite que a transição entre secções contíguas seja feita de forma suave sem a ocorrência de saltos de fase indesejados.

- Deve haver algum cuidado no dimensionamento das secções para que as variações de k entre cada secção sejam suaves. Caso contrário pode ocorrer um efeito de superestrutura, originando réplicas do pico de reflexão noutros comprimentos de onda.

2.5 – Gravação de redes de Bragg em fibra óptica

2.5.1 – Introdução

Nesta subsecção são descritas as principais técnicas de gravação de redes de Bragg em fibra óptica. São elas a gravação por máscara de fase e gravação por interferómetro. É também descrita a técnica de gravação que está a ser implementada no Instituto de Telecomunicações – Pólo de Aveiro.

2.5.2 – Técnicas experimentais de gravação

Nesta secção faz-se uma breve referência às principais técnicas de gravação de redes de Bragg em fibra óptica. A técnica mais comum consiste na exposição de uma fibra fotossensibilizada a um padrão de franjas de interferência na região do ultravioleta. Este padrão pode ser obtido directamente através de uma máscara de fase ou através de um interferómetro. É possível, com estes dois métodos gravar diferentes tipos de redes, tendo em conta as diversas variantes que apresentam. Com o método do interferómetro é possível obter redes com diferentes comprimentos de onda, variando os ângulos de interferência. No caso da máscara de fase o mesmo é conseguido aplicando uma tensão longitudinal na fibra durante o processo de gravação. Consegue-se também gravar redes com um comprimento maior do que o diâmetro do feixe fazendo um varrimento ao longo da fibra, ou, no caso de redes mais longas, gravar redes adjacentes sem saltos de fase. Podem-se também gravar redes com saltos de fase, ajustando a posição do feixe UV. Esta técnica para além dos saltos de fase permite aplicar

apodizações complexas. A gravação de redes apodizadas é possível ajustando o tempo de exposição nos vários pontos da rede, no caso do varrimento do feixe, ou por dupla exposição. Uma das técnicas de apodização consiste na alteração da visibilidade das franjas através do ajuste mecânico da incidência do feixe numa máscara de fase. Alterando a frequência e amplitude de variação do ângulo de incidência do feixe é possível alterar a visibilidade das franjas de interferência e, consequentemente, alterar a apodização. [4]

2.5.3 – Gravação por máscara de fase

A técnica da máscara de fase é uma das técnicas mais eficazes para a gravação de redes de Bragg em fibra óptica. A máscara de fase trata-se de um elemento de difracção óptica, usado na transmissão, que consiste numa sequência de depressões longitudinais na superfície de um substrato de sílica. O princípio de funcionamento da técnica da máscara de fase baseia-se na sobreposição de duas ordens de difracção do feixe UV no núcleo da fibra que intersecta a zona de sobreposição.

Na figura 2.5 é possível observar as ordens de difracção -1 e +1. Quando a incidência é normal, o que se pretende é maximizar as ordens +1 e -1 e minimizar a ordem 0.

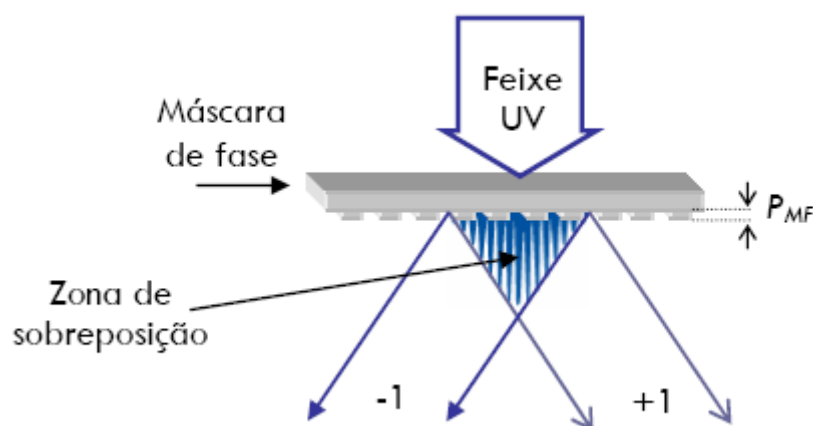


Figura 2.5 – Representação esquemática da difracção das ordens -1 e +1 na máscara de fase.[4]

A fibra deve estar posicionada logo a seguir à máscara de fase, por forma a que a parte onde se pretende gravar a rede esteja incluída na zona de sobreposição das ordens difractadas. Esta sobreposição origina franjas de interferência, que irão formar as redes de Bragg com um período $\Lambda = \Lambda_{MF}/2$, onde Λ_{MF} é o período das depressões da máscara de fase. No caso da incidência normal, se a intensidade da radiação for muito elevada, poderá ocorrer interferência da ordem 0, sendo o período das franjas igual ao da máscara de fase. É importante também ter em conta a coerência espacial do laser que deve ser superior à distância entre a máscara de fase e do núcleo da fibra.

A fibra não deve estar em contacto com a máscara uma vez que pode, a máscara de fase, ficar danificada.

2.5.4 – Gravação por interferómetro

2.5.4.1 – Interferómetro por divisão de amplitude

A gravação de redes de Bragg pode ser efectuada por exposição transversal. Utiliza-se um interferómetro por divisão de amplitude. Podemos ver a representação desta técnica na figura 2.6.

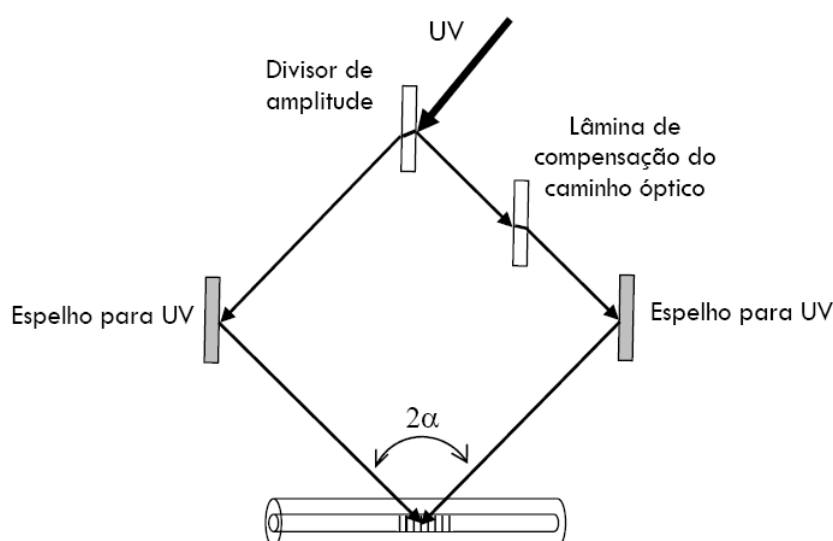


Figura 2.6 - Representação de um interferómetro por divisão de amplitude para a gravação de redes de Bragg.[4]

Como se pode observar pela figura 2.6, o feixe UV é dividido em dois, com amplitudes idênticas, através do divisor de amplitude. Estes dois feixes são reflectidos por espelhos próprios para a emissão ultravioleta e vão recombinar-se no núcleo da fibra formando um ângulo de 2α entre eles criando assim um padrão de interferência. O período das franjas de interferência, Λ , é dado por:

$$\Lambda = \frac{\lambda_{UV}}{2n_{eff} \sin \alpha} \quad (2.22)$$

Comparando este método com o método da máscara de fase no que diz respeito às expressões obtidas, pode-se concluir que é possível gravar redes com comprimentos de onda de Bragg entre valores próximos de λ_{UV} até ao infinito (quando $\alpha = 0$) o que torna este método mais flexível. Neste método é necessário ter cuidado com os factores externos, nomeadamente as vibrações e turbulência do ar, uma vez que podem deteriorar significativamente a gravação. Em relação ao laser, se tiver baixa coerência temporal, é necessário corrigir a diferença de percursos ópticos provocada pelo divisor de amplitude.

2.5.4.2 – Interferómetro com máscara de fase

Com este método é usada uma máscara de fase para fazer a divisão de amplitude tal como representado na figura 2.7.

Neste método excluem-se todas as ordens, excepto as ordens -1 e +1. Depois da reflexão destas ordens em espelhos próprios são direccionadas para a fibra fotossensibilizada onde será feita a gravação. Podem ser também utilizadas as ordens 0 e -1 embora não seja tão prático. De forma a gravar redes inclinadas, basta rodar a extremidade de uma fibra em relação à outra.

Este método pode ser mais dispendioso, mas possui algumas vantagens importantes. Como se pode ver pela figura 2.7 a incidência na máscara de fase é

normal a esta, o que simplifica o alinhamento. A máscara de fase surge também como um ponto de referência para o comprimento de onda do feixe. Com esta técnica consegue-se obter sintonias extremamente elevadas.

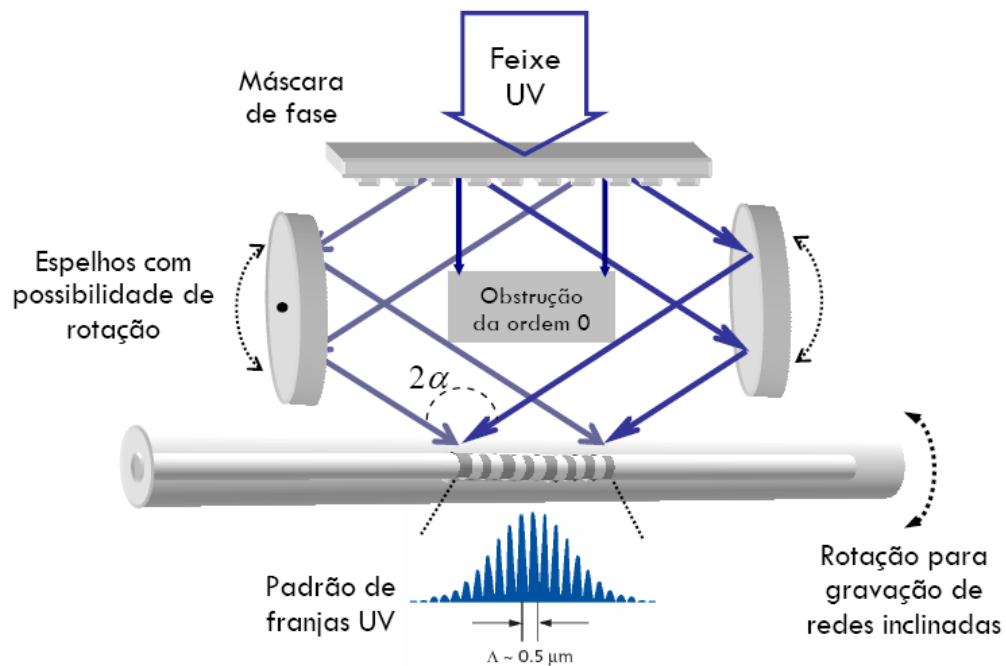


Figura 2.7 - Representação do método de gravação de redes de Bragg por interferômetro com máscara de fase.[4]

É possível obter-se uma elevada sintonia do comprimento de onda das redes, colocando uma lente a seguir à máscara de fase e fazendo variar as distâncias focais e a distância da lente à fibra.

2.5.5 – Gravação de redes longas

Nos métodos que se descreveu anteriormente, o comprimento das redes gravadas é aproximadamente igual ao diâmetro do laser. Para se gravar redes mais longas a solução não passa por desenvolver lasers de maior diâmetro, devido a problemas de instabilidade. Para contornar esta situação, utiliza-se a técnica de gravação por varrimento. Esta técnica pode ser usada tanto na

gravação por interferómetro como na gravação por máscara de fase e consiste no varrimento do laser no plano de gravação. Se o resto do sistema permanecer imóvel, o comprimento da rede gravada corresponde à amplitude de varrimento através do laser, para a mesma densidade de potência. Neste caso o comprimento da rede cai ser condicionado pela amplitude de varrimento, pela largura dos espelhos e pelo comprimento da máscara de fase (quando utilizada). Estas limitações serão importantes se se quiser gravar redes extremamente longas, como na compensação da dispersão. Desta forma este método não permite a gravação de tal tipo de redes, pelo que é necessário recorrer a outras técnicas. Uma das formas consiste em gravar sequencialmente um conjunto de redes adjacentes na fibra. O posicionador da fibra terá que ter uma elevada precisão, por forma a que não surjam saltos de fase entre as redes adjacentes. Se se optar uma máscara de fase fixa, apenas se consegue gravar redes com o comprimento de onda estabelecido pela máscara de fase. Para contornar esta situação pode usar-se um interferómetro para manipular o comprimento de onda de um conjunto de redes. É possível programar o controlo dos posicionadores de forma a ajustar o interferómetro em função da posição na fibra. Tal como nas outras técnicas a fibra tem de estar colocada na zona de sobreposição das duas ordens. Também é possível usar apenas uma máscara de fase movendo-a a uma velocidade V_{MF} , enquanto que a fibra é movida a uma velocidade V_F . A relação entre o comprimento de onda gravado e o comprimento de onda original é

$$\Delta\lambda = \Lambda_{\text{Bragg}} \frac{V_F}{V_{MF}} \quad (2.23)$$

Onde Λ_{Bragg} representa o período da rede gravada numa situação estática. Desta forma é possível gravar redes com diferentes aperiodicidades variando as duas velocidades envolvidas no processo.

2.5.6 – Sistema de gravação implementado

O sistema de gravação de redes de Bragg implementado no Instituto de Telecomunicações – Pólo de Aveiro está representado, de uma forma simplificada, através do esquema da figura 2.8

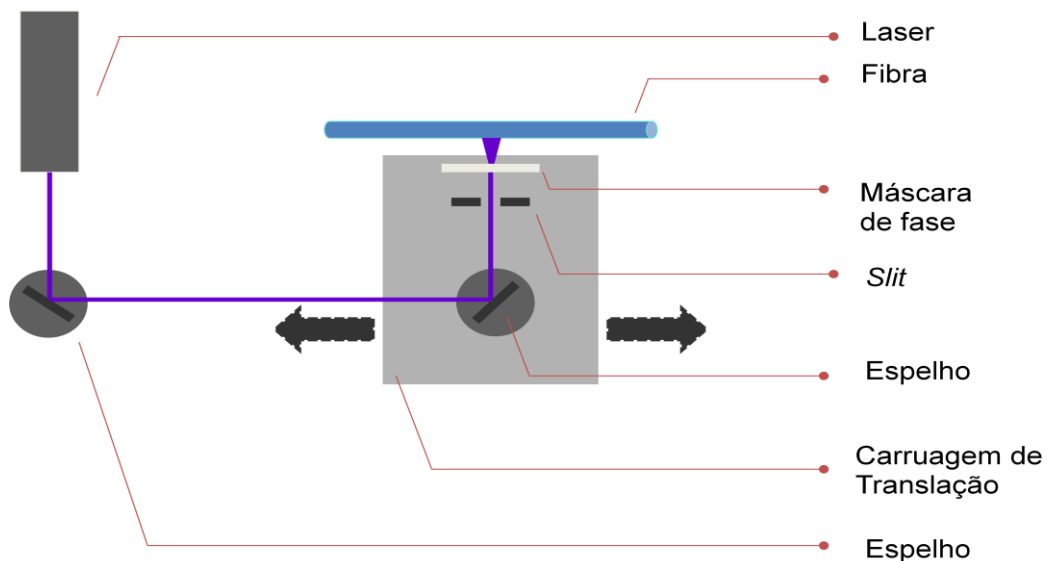


Figura 2.8 – Representação simplificada do método de gravação implementado.

O laser de UV emite com um comprimento de onda central de 248nm. A fibra óptica encontra-se imóvel enquanto o sistema feixe/máscara de fase pode-se mover.

O processo de gravação depende, em grande parte, do *Step* que o utilizador pretender realizar. O *Slit* representado na figura 2.8 define a largura do feixe, que por sua vez, corresponde ao *Step* a utilizar. Quanto menor o *Step*, maior a precisão, à custa de uma gravação mais lenta. As etapas evoluem de acordo com um ficheiro que indica os *steps* a serem considerados para gravar a rede com uma determinada visibilidade ($v(z)$) e tamanho (L) e a variação do índice de refração.

No capítulo 3 encontra-se todo o processo desenvolvido.

Capítulo 3

Algoritmo para implementação de FBGs pelo método de *stitching*

3.1 – Introdução

O objectivo deste algoritmo é calcular a sequência dos *steps* traduzidos para o método de *stitching*.

Este recebe a visibilidade (v) ao longo do comprimento da rede (L) e gera um ficheiro com a sequência de *steps* a serem efectuados pela carruagem de translação (Figura 3.1)

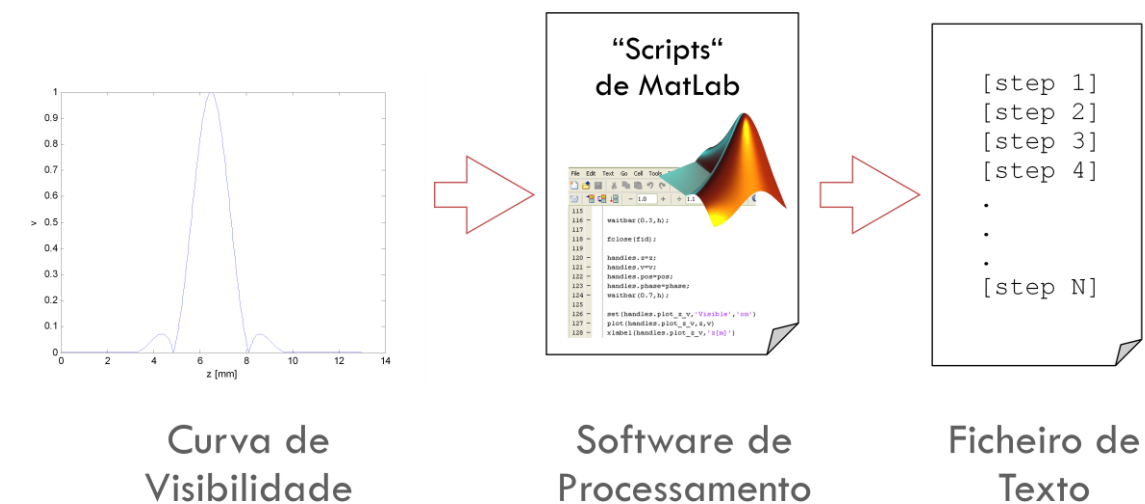


Figura 3.1 – Representação esquemática do projecto desenvolvido

Neste capítulo apresenta-se a implementação do mesmo.

3.2 – Princípios básicos

Como se disse anteriormente, uma rede de Bragg em fibra óptica trata-se de uma modelação periódica do índice de refração. Esta variação do índice de refração pode definir-se como sendo sinusoidal para a maioria dos casos.

Sejam v_1 e v_2 as visibilidades de duas FBGs, que variam entre 0 e 1. Se duas FBGs com o mesmo período forem gravadas em sobreposição, a amplitude de modulação resultante irá depender da respectiva fase relativa.

Na figura 3.2 encontra-se a representação esquemática do processo de sobreposição de duas FBGs com o mesmo período de modulação.

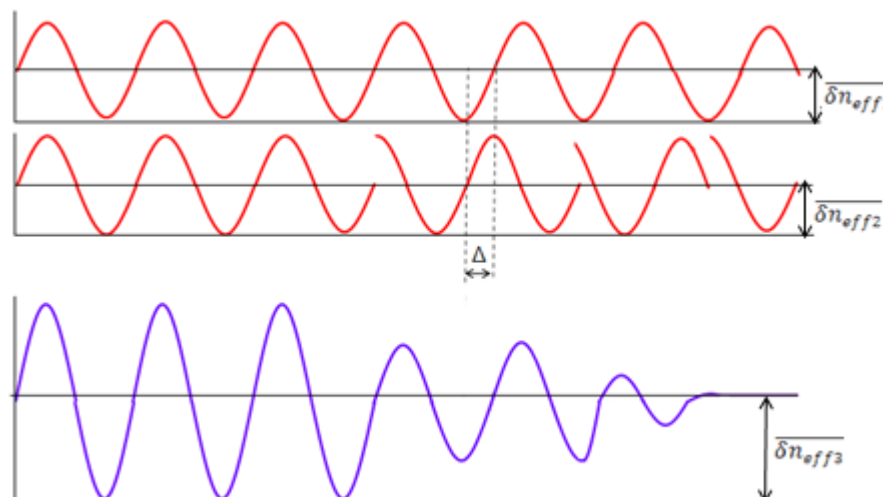


Figura 3.2 – Representação esquemática do processo de sobreposição de duas FBGs com o mesmo período de modulação. A sobreposição de duas FBG iguais (em cima) origina uma outra FBG com $\delta n_{eff3} = \delta n_{eff1} + \delta n_{eff2}$, mas com visibilidade dependente da fase relativa das FBGs.

Nesta abordagem, foi considerado que existe uma relação linear da alteração do índice de refração em relação à energia fornecida para que a sobreposição das duas FBG iguais e em fase, resulte numa FBG com o dobro da variação do índice de refração de cada uma delas. Esta relação é válida para energias baixas. Para

altas energias o processo de fotossensibilidade torna-se não linear, pelo que será necessário utilizar um modelo mais complexo.

A visibilidade pode ser representada pela arcada de um coseno cujo ângulo é $\theta/2$, onde θ é um ângulo que varia de 0 a π .

$$v = \cos \frac{\theta}{2} \quad (3.1)$$

Ou, de outra forma,

$$\theta = 2 \cos^{-1}(v) \quad (3.2)$$

É necessário traduzir o desfasamento de forma a ser interpretado correctamente pelo sistema de gravação. Desta forma é necessário obter uma relação entre o desfasamento em radianos e o desfasamento em *steps* (reconhecido pelo sistema de gravação). Seja θ o desfasamento em radianos e $\Delta z(v)$ o desfasamento em *steps*. Tem-se a seguinte relação:

$$\theta = \frac{\Delta z(v)}{\Lambda} \times 2\pi \quad (3.3)$$

onde Λ é o período da rede.

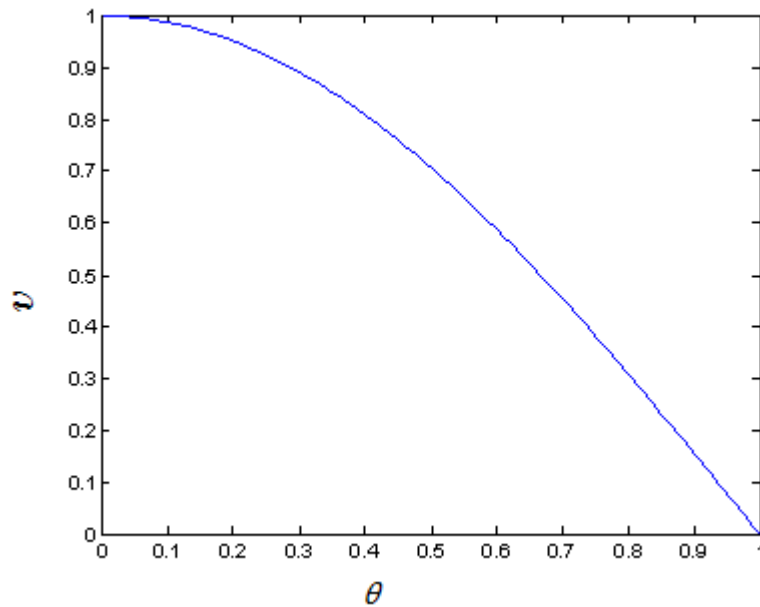


Figura 3.3 – Visibilidade (v) em função do desfasamento $\theta/(\pi$ radianos)

Como se pode observar pela Figura 3.3 esta relação é máxima quando não existe nenhum desfasamento entre as duas ondas, ou seja, quando as mesmas se encontram em fase.

Considere-se a seguinte envolvente, com comprimento (z) de 13 mm

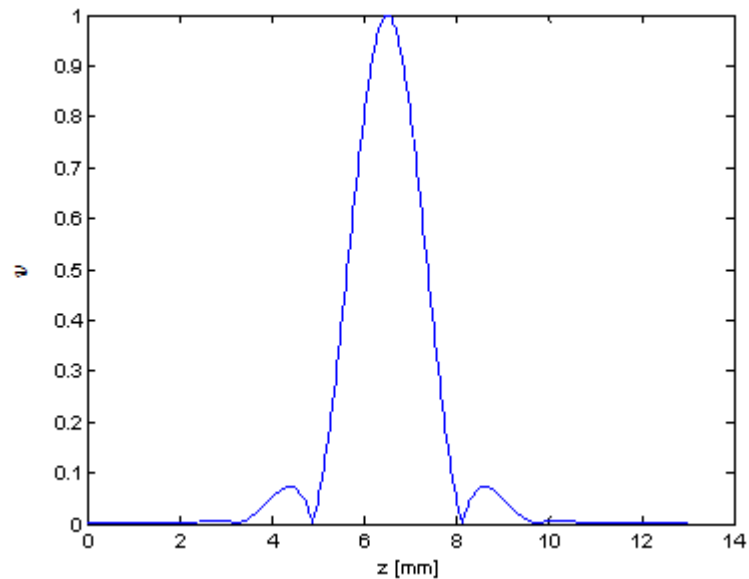


Figura 3.4 – Visibilidade em função do comprimento z (mm)

Tendo em conta a figura 3.4 pode-se obter a curva da figura 3.5 que representa a visibilidade em função do desfasamento normalizado ao período. Tendo em conta o processo de gravação, a visibilidade máxima obtém-se para um *step* nulo, uma vez que as ondas estão em fase. Da mesma forma, quando as ondas estão em oposição de fase (à qual corresponde um *step* de metade do período) temos a visibilidade mínima, zero.

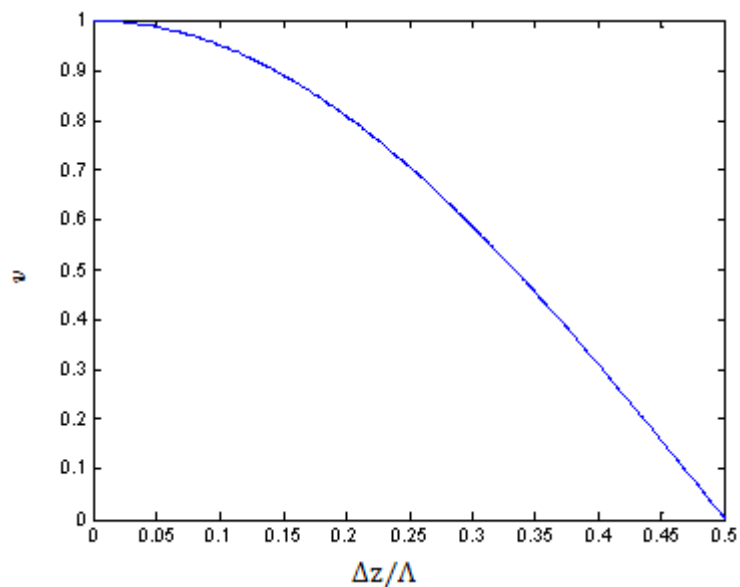


Figura 3.5 – Visibilidade em função do desfasamento $\Delta z(v)$ normalizado ao período

Tendo em conta a forma como será efectuado o processo de gravação a figura 3.6 apresenta o aspecto da envolvente discretizada com *Step* de 100 μm .

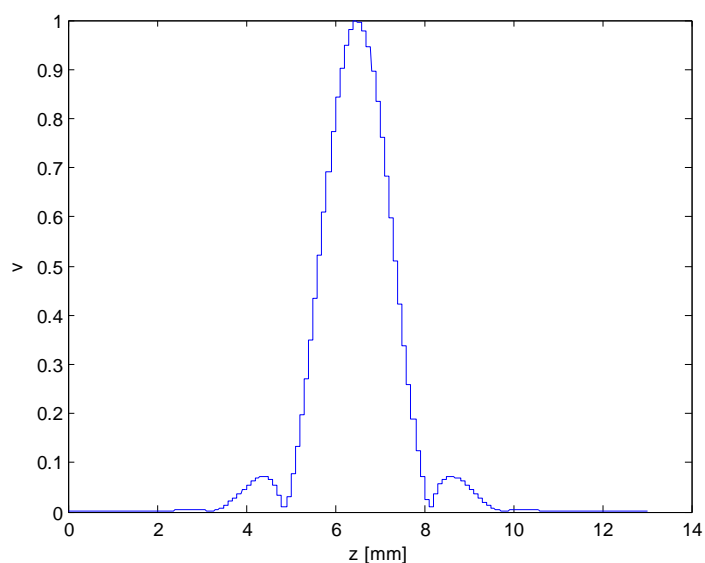


Figura 3.6 – Envolvente discretizada tendo em conta um *step* de 100 μm

3.3 – Determinação de *steps*

De acordo com as expressões (3.2) e (3.3) determinadas anteriormente, pode-se chegar à seguinte expressão, que relaciona os *steps* (Δz) com a visibilidade (v).

$$\Delta z(v) = \frac{\Lambda}{\pi} \times \cos^{-1}(v) \quad (3.4)$$

O cálculo dos *steps*, que possibilita a gravação de redes com um determinado perfil de visibilidade, através do método de *stitching*, foi implementado usando as seguintes iterações:

$$\Delta z_1 = 0; \quad \Delta z_2 = \Delta z(v_1); \quad \Delta z_3 = \text{Step}_{\text{round}} - \Delta z_2 \quad \Delta z_4 = \Delta z(v_2) \dots \quad (3.5)$$

Considere-se o seguinte trecho do ficheiro de leitura:

z [m]	v
0.006496749674967496	0.99999104620825541
0.006498049804980498	0.99999677662773201
0.006499349934993499	0.99999964184712342
0.006500650065006500	0.99999964184712342
0.006501950195019500	0.99999677662773201
0.006503250325032503	0.99999104620825541
0.006504550455045504	0.99998245062730651

Tabela 3.1 – Trecho do ficheiro de leitura

Apresenta-se a seguir parte da tabela de valores de deslocamento resultante:

Δz [mm]
0.0999834
0.0001063
0.1000036
0.0000855
0.1000244
0.0000641
0.1000458
0.0000424
0.1000675

Tabela 3.2 – Trecho da tabela de valores de deslocamento

Neste exemplo, o *Step* introduzido pelo utilizador foi de 100 μm . Como já foi dito, este valor é arredondado ao valor mais próximo, múltiplo do período. Assim, como

$$\Lambda = \frac{\Lambda_{MF}}{2} \quad (3.6)$$

e o Λ_{MF} utilizado foi de 1065 nm, recorrendo à seguinte expressão,

$$\text{Step}_{\text{round}} = \text{round}\left(\frac{\text{Step}}{\Lambda}\right) \times \Lambda \quad (3.7)$$

obtém-se $\text{Step}_{\text{round}} = 100,11 \mu\text{m}$. Na expressão (3.7) *round* é uma função que aproxima ao inteiro mais próximo.

O que determina o perfil desejado é o deslocamento que sofre a carruagem de translação, tendo em conta o ficheiro de gravação com os *steps*.

A sequência de iterações descrita através de (3.5), pode ser alterada se na rede existirem *phase shifts*. Podem ocorrer duas situações:

- O ficheiro de leitura fornece a posição dos *phase shifts*
- Não são fornecidas as posições dos *phase shifts*.

Dentro destas existem as seguintes situações: O utilizador prime o botão de *Auto-detect Phase shifts* (Apêndice C) e, neste caso, não interessa se foram ou não fornecidos os valores no ficheiro, pois será feito o cálculo automático dos mesmos. Se não for pressionado o botão, ou não são fornecidos os valores e neste caso não existem *phase shifts* a considerar, ou então a posição dos *phase shifts* é fornecida no ficheiro de leitura.

Qualquer que seja a situação, na posição do *phase shift*, é adicionado a Δz o valor $\frac{\Lambda\phi}{2\pi}$, onde ϕ representa o valor do *phase shift* em radianos. Através desta expressão é fácil verificar que para um *phase shift* de π radianos temos um acréscimo de $\Lambda/2$.

Consideremos que temos um *phase shift* na 5ª posição. Desta forma iremos ter:

$$\Delta z_4 = \Delta z(v_2); \quad \Delta z_5 = \text{Step}_{\text{round}} - \Delta z_4 + \frac{\Delta \phi}{2\pi}; \quad \Delta z_6 = \Delta z(v_3) \dots \quad (3.8)$$

A detecção directa dos *phase shifts* será abordada na próxima secção.

3.4 – Auto-Detect Phase Shifts

Esta é uma opção que está disponível na interface gráfica usada pelo utilizador. (Apêndice C). Como já foi dito, permite que sejam calculados os *phase shifts* automaticamente. Este processo é feito da seguinte forma.

A função responsável por determinar os pontos de *phase shift* recebe como parâmetros de entrada os pontos da envolvente.

Para perceber o conceito vamos usar uma função simples.

Seja x uma variável definida de -10 a 10 com 1000 pontos. Seja y a seguinte função:

$$y = |x^2 - 10| \quad (3.9)$$

Calculando a derivada de y obtém-se os pontos de descontinuidade visíveis na figura 3.7 a verde. A azul está representada a curva da função y . Como podemos observar, a curva a vermelho apresenta mais pontos na zona de descontinuidade da derivada, sendo que esta curva é obtida pela derivada do logaritmo da função y .

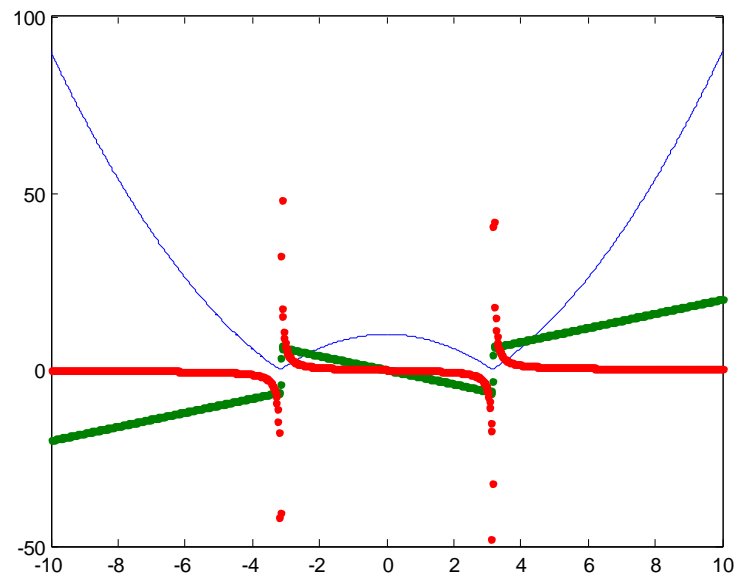


Figura 3.7 – Exemplo de descontinuidades da derivada. A azul temos a função $y = |x^2 - 10|$. A verde está representada a derivada de y e a vermelho a derivada do $\log(y)$.

Assim, voltando à envolvente, é de todo mais vantajoso que, para a determinação dos pontos de *phase shift*, se determine a derivada do logaritmo da envolvente, uma vez que se avançarmos ponto a ponto a descontinuidade é mais acentuada na função derivada do logaritmo do que na derivada da envolvente, tornando-se o algoritmo mais sensível à existência de *phase shifts*.

Para detectar as descontinuidades, percorremos todos os pontos e procuramos aqueles em que exista descontinuidade maior que um valor previamente definido. Este valor foi encontrado por tentativa erro. Obviamente que esta funcionalidade só é válida para perfis onde as zonas de descontinuidade coincidam com *phase shifts*, como é o caso de algumas envolventes do tipo sinc. Para as outras situações, a posição dos *phase shifts* terá que ser dada através do ficheiro de entrada.

3.5 – Simulação de envoltentes

O espectro de reflectividade e atraso de grupo é determinado usando o método da matriz de função transferência [5].

Considere-se a envoltente azul, representada na figura 3.8. Trata-se de uma rede do tipo sinc com uma função de modelação cujo objectivo é anular os lóbulos laterais. Tem 13 mm de comprimento. A azul temos a envoltente que se pretende gravar, a preto a envoltente gerada com um *Step* de 90 μm e a vermelho a mesma envoltente gerada com um *Step* de 150 μm .

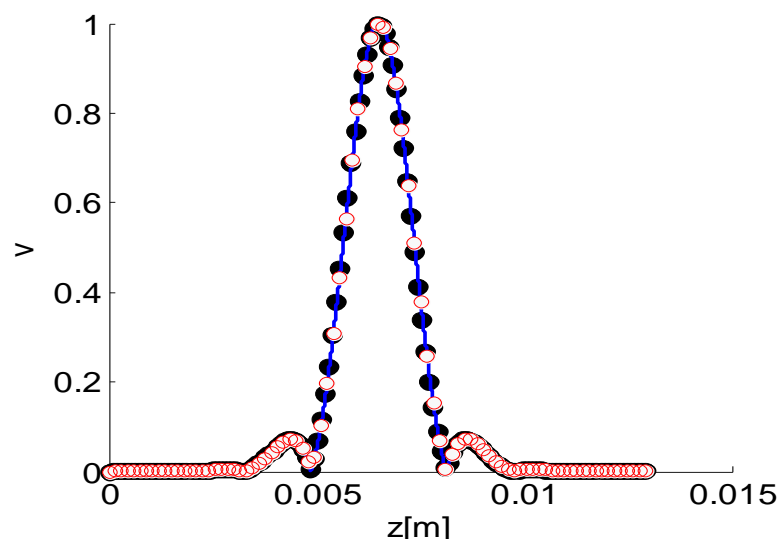


Figura 3.8 – Perfis de envoltente com diferentes Step. A azul envoltente a ser gravada, a preto envoltente final com Step de 90 μm e a vermelho envoltente com Step de 150 μm .

Recorrendo ao método da matriz de transferência apresentado na secção 2.4.1, com 13 mm de comprimento e um *Step* de 90 μm , a rede a preto fica dividida em 144 redes uniformes, enquanto que, com um *Step* de 150 μm a rede é dividida em 86 redes uniformes de igual comprimento.

É importante verificar o efeito destas envoltentes, tendo em conta a reflectividade e o atraso de grupo resultantes.

Esta simulação foi efectuada recorrendo a um simulador feito em MatLab, denominado GOSiP (Apêndice B).

O simulador recebe alguns parâmetros que deverão ser inicializados. Assim, para efeitos de simulação, considerou-se que o índice de refacção efectivo do núcleo

da fibra toma o valor 1.45 (n_{eff}). O valor de λ_{Bragg} é determinado recorrendo à expressão (2.4), ou, de outra forma,

$$\lambda_{Bragg} = 2 \times n_{eff} \times \frac{\Lambda_{MF}}{2} \quad (3.10)$$

o que resulta num $\lambda_{Bragg}=1544.25$ nm. Para a rede descrita no exemplo, $\overline{\delta n_{eff}} = 26 \times 10^{-5}$ que representa a variação do valor médio da modulação.

Para obter a resposta espectral ideal da envolvente, isto é, sem a discretização dada pelo *Step*, consideram-se M secções determinadas da seguinte forma:

$$M = floor\left(\frac{L}{60 \times \Lambda}\right) \quad (3.11)$$

Desta forma, considera-se que se tem 60 períodos em cada secção. Na expressão (3.11) *floor* é uma função que arredonda para um valor inteiro, eliminando a parte decimal.

A diferença principal entre a simulação da envolvente ideal e da que pretendemos gravar com um determinado *Step*, reside precisamente no cálculo do número de secções, M . Neste caso temos:

$$M = floor\left(\frac{L}{step}\right) \quad (3.12)$$

Na figura 3.9 encontra-se a resposta espectral simulada da rede da figura 3.8, assim como a comparação com o filtro ideal.

Verifica-se que a resposta das redes simuladas com *Steps* de 90 μm e 150 μm são muito semelhantes à ideal.

Nestas redes, como se pode observar pela figura 3.9 (d) o atraso de grupo permanece constante na banda de passagem, com um *ripple* que não ultrapassa os 10 ps. Esta característica não é alterada com nenhum dos *Steps* que foram simulados.

Considere-se agora *Steps* maiores, nomeadamente, 300 μm e 500 μm .

Na figura 3.10 apresenta-se a comparação da resposta espectral destas redes com a resposta ideal.

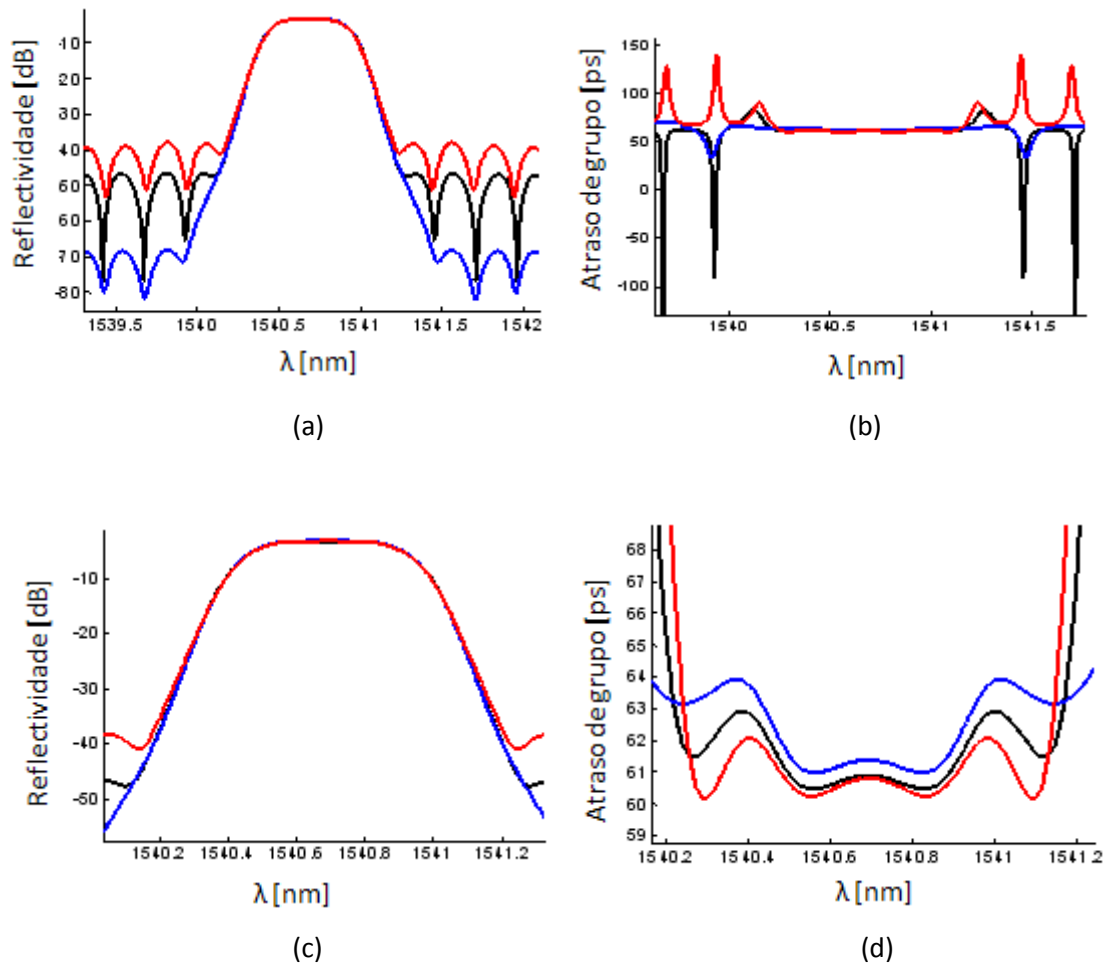


Figura 3.9 – Comparação da resposta espectral da rede com a resposta ideal.

Resultados da medição da resposta em:

- 150 μm

(a) ; (c) – Reflectividade

(b) ; (d) – Atraso de Grupo - 90 μm

- ideal

Através da análise da figura 3.10 (d) verifica-se que à medida que o *Step* aumenta, o *ripple* na banda de passagem aumenta, não ultrapassando os 10 ps, tal como nas envolventes com um *Step* menor.

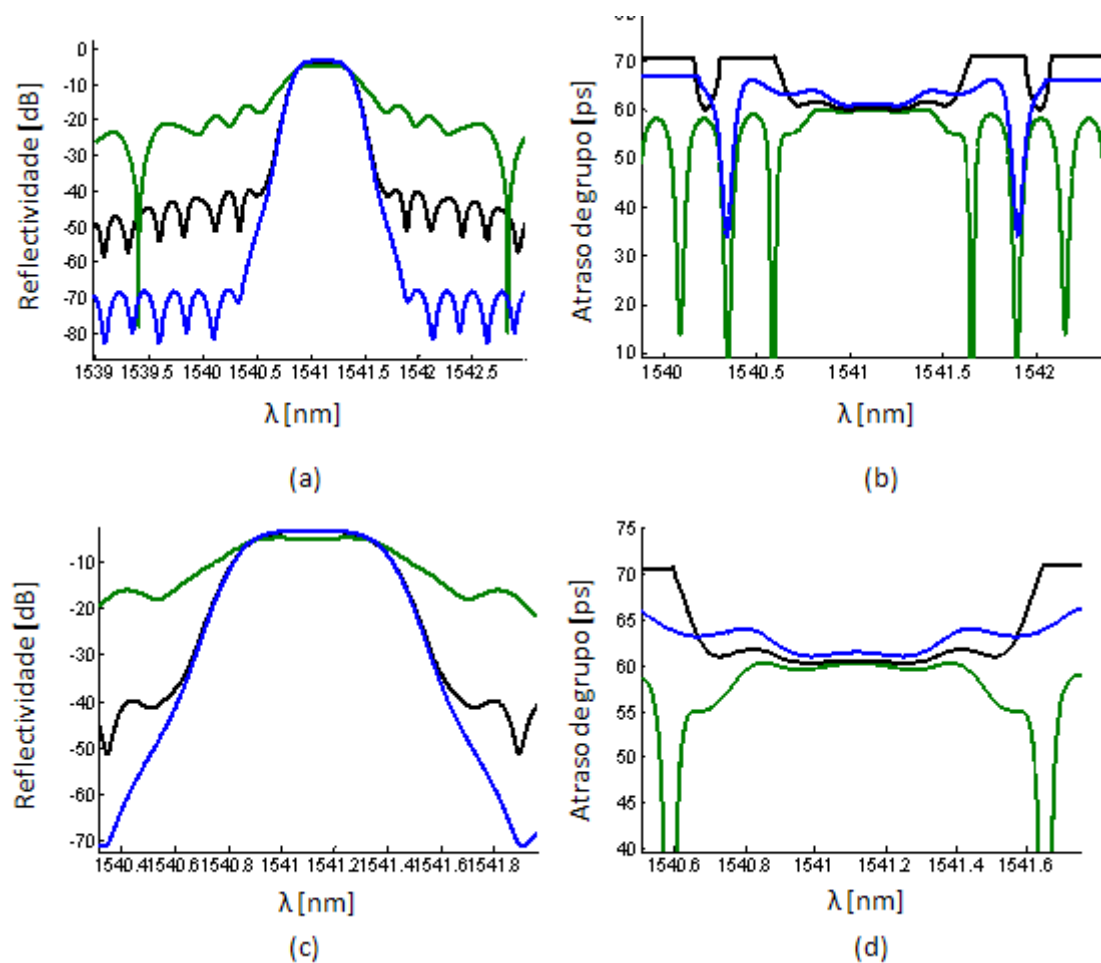


Figura 3.10 – Comparação da resposta espectral da rede com a resposta ideal.

Resultados da medição da resposta em:

(a) ; (c) – Reflectividade

(b) ; (d) – Atraso de Grupo - 300 μm

- 500 μm

- ideal

Considere-se agora uma outra envolvente, representada na figura 3.11, com 40 mm de comprimento. A azul temos a envolvente que se pretende gravar, a preto a envolvente gerada com um *Step* de 200 μm e a vermelho a mesma envolvente gerada com um *Step* de 100 μm .

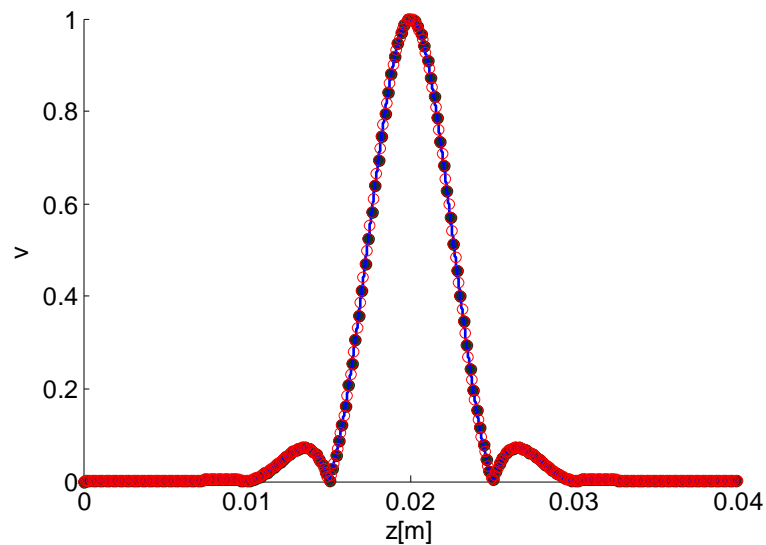


Figura 3.11 – Perfis de envoltura com diferentes Steps. A azul envoltura a ser gravada, a preto envoltura final com Step de 200 μm e a vermelho envoltura com Step de 100 μm .

Quando se considera um Step de 100 μm , a rede está dividida em 400 redes uniformes, enquanto que, com um Step de 200 μm a rede é dividida em 200 redes uniformes de igual tamanho.

Esta rede possui um $\overline{\delta n_{eff}} = 9 \times 10^{-5}$ (variação do valor médio da modulação).

A envoltura ideal é simulada com $M = 1296$ que corresponde a ter em cada secção 58 períodos.

Na figura 3.12 encontra-se a resposta espectral simulada da rede da figura 3.11, assim como a comparação com o filtro ideal.

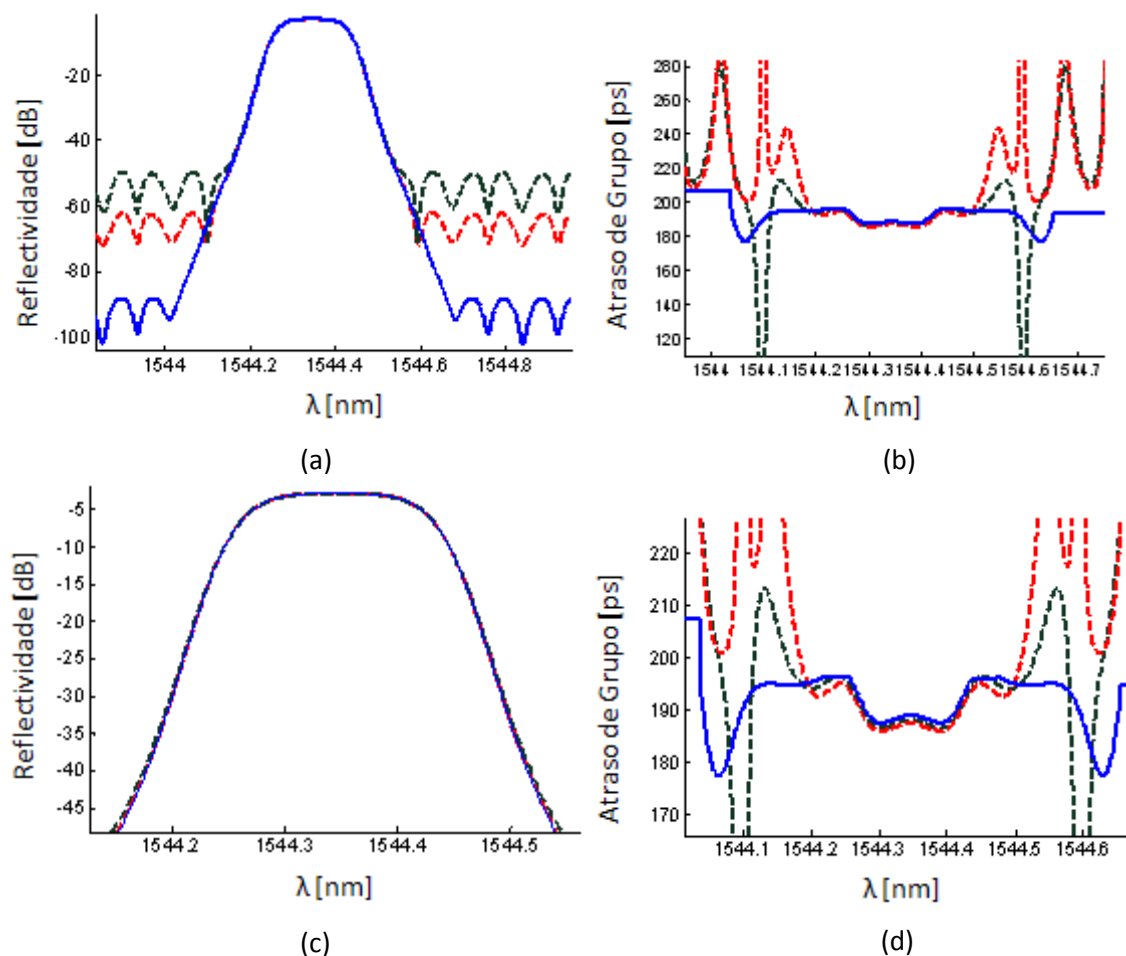


Figura 3.12 – Comparação da resposta espectral da rede com a resposta ideal.

Resultados da medição da resposta em:

-- 100 μm

(a) ; (c) – Reflectividade

(b) ; (d) – Atraso de Grupo -- 200 μm

- ideal

Dos resultados apresentados podemos concluir que as redes simuladas, com os referidos *Steps*, apresentam uma resposta (espectro de reflectividade e atraso de grupo) que está muito próxima da resposta ideal. O atraso de grupo é praticamente constante na banda de passagem com um ripple inferior a 10 ps. Assim, um *Step* maior pode ser usado, resultando um tempo menor de produção e a redução de erros devido à flutuação de potência do laser.

3.6 – Impacto do *Step* utilizado no desempenho da FBG

Nesta subsecção será analisado, por simulação, o impacto do *Step* de gravação utilizado, na resposta obtida da FBG correspondente, por análise do desempenho de um sistema de comunicações ópticas.

O sistema consiste resumidamente num laser monomodo modulado externamente, utilizando um interferómetro de Mach-Zehnder (MZI), por um sinal NRZ (ritmo 25 Gbit/s), proveniente de um gerador de sequências pseudo-aleatórias (comprimento $2^{10} - 1$ bits), e passando por um filtro passa-baixo de largura de banda $0.75 \times \text{ritmo}$. O MZI tem perdas de inserção iguais a 6 dB e o sinal óptico à sua entrada apresenta uma potência média de -25 dBm.

O sinal óptico é depois injectado numa fibra monomodo standard ($D=17$ ps/nm/km, atenuação 0.2 dB/km e índice de refração não linear de 2.6×10^{-20} m²/W) com 20 km de comprimento, e amplificado utilizando um EDFA ($G=15$ dB, $N_F=6$ dB).

O sinal passa pelo depois filtro óptico simulado, correspondente à gravação da grating com os diferentes *Steps*.

No receptor é feita a detecção directa com auxílio de um fotodíodo PIN de responsividade (1 A/W), com fontes de ruído quântico e ruído térmico (1.8×10^{-11} A/ $\sqrt{\text{Hz}}$). Na figura 3.13 está representado o sistema de simulação.

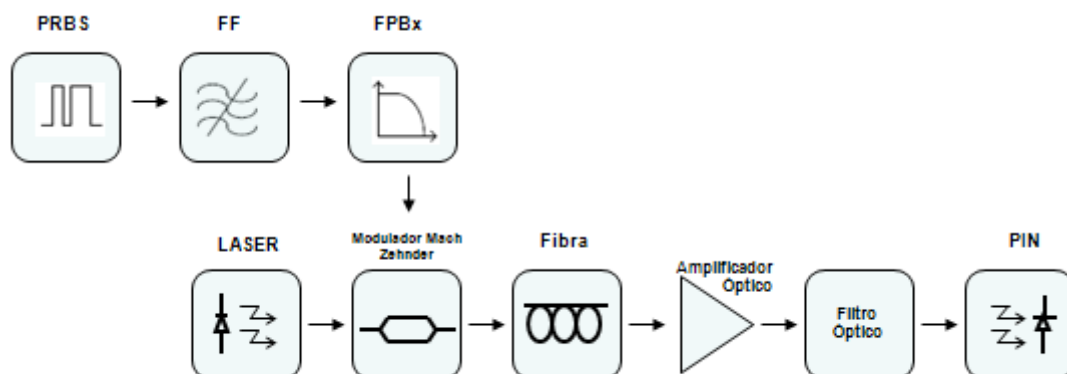


Figura 3.13 – Sistema de simulação. PRBS - pseudo random-binary sequence; FF - filtro formatador; FPBx - Filtro passa baixo; PIN - fotodíodo;

Por forma a avaliar o desempenho do sistema pode-se analisar o factor Q [6] associado ao sinal recebido.

A figura 3.14 apresenta os resultados da simulação Q vs *Step* gravação.

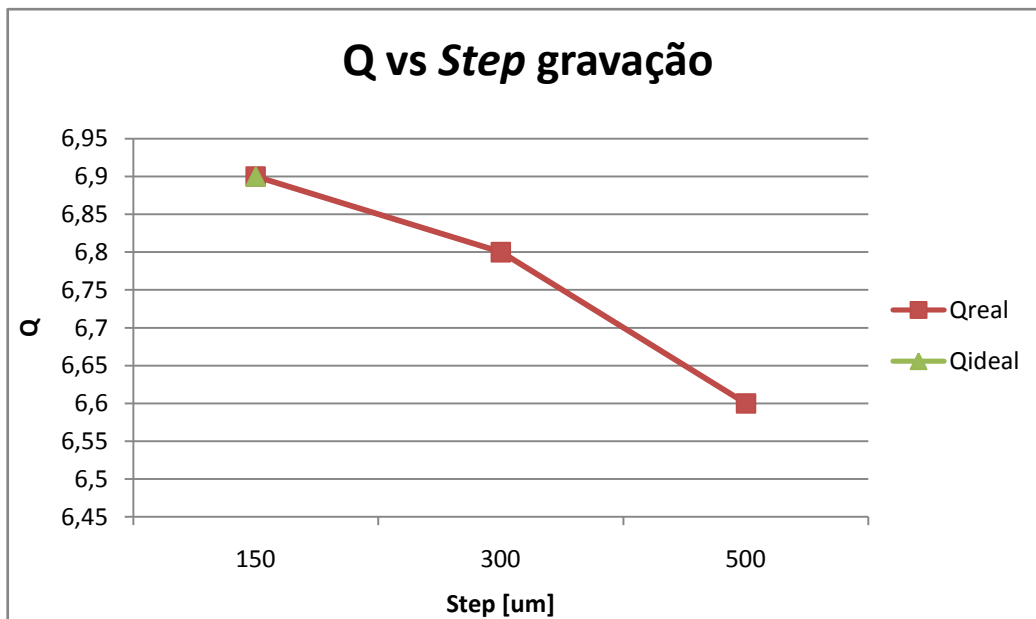


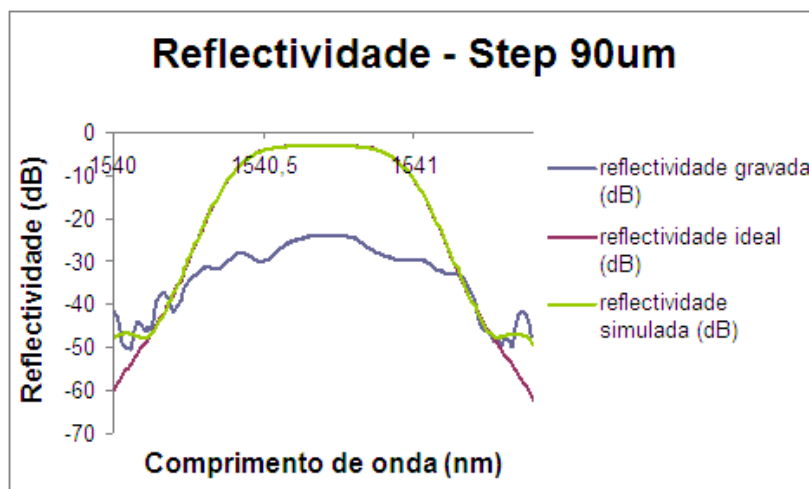
Figura 3.14 – Q vs *Step* gravação para diferentes Steps

Através da figura 3.16 pode-se verificar que à medida que o *Step* de gravação aumenta, existe um decréscimo do factor Q devido à consequente degradação (maior ripple) no atraso de grupo associado, como se observa na figura 3.10.

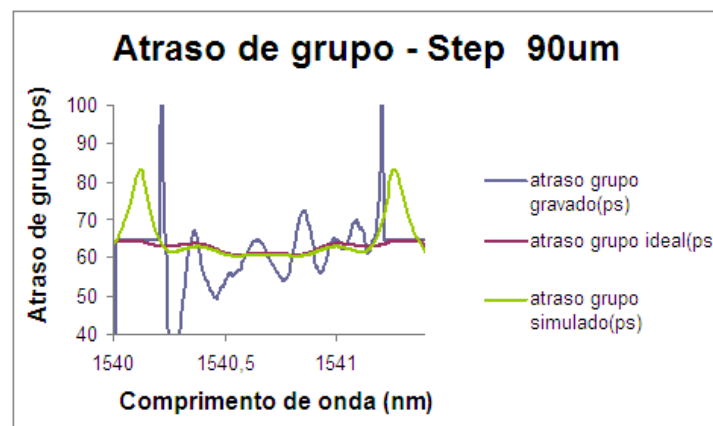
3.7 – Gravação de envoltantes

Nesta subsecção são apresentadas diversas envoltantes gravadas no Instituto de Telecomunicações – Pólo de Aveiro, com o apoio do algoritmo desenvolvido. A rede gravada foi a rede representada na figura 3.8, com 13 mm de comprimento. Serão comparadas as respostas das redes gravadas com a resposta ideal e simulada, para diferentes *Steps*.

Na figura 3.15 encontra-se a resposta espectral de uma rede gravada com um *Step* de 90 μm .



(a)

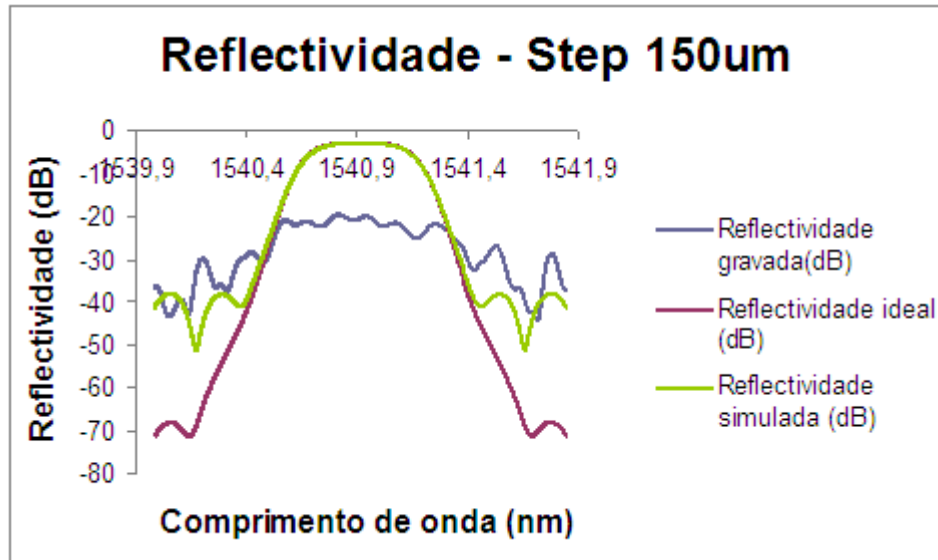


(b)

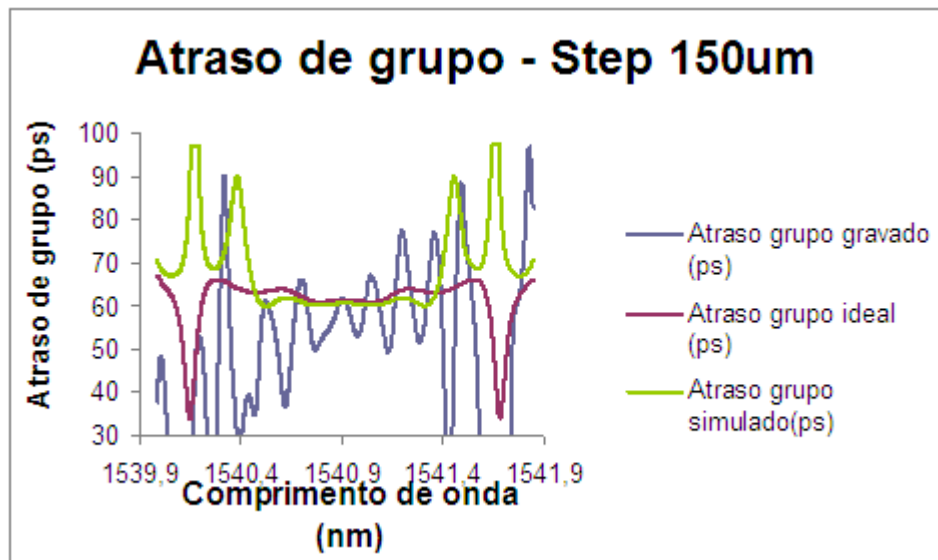
Figura 3.15 – Comparação da resposta espectral da rede gravada com a resposta ideal e simulada para um *Step* de 90 μm . (a) Reflectividade (b) Atraso de grupo

Na banda de passagem, apesar do ripple ser reduzido (máximo 10 ps), este é superior ao simulado.

Na figura 3.16 está representada a resposta da rede, agora para um *Step* de 150 μm .



(a)

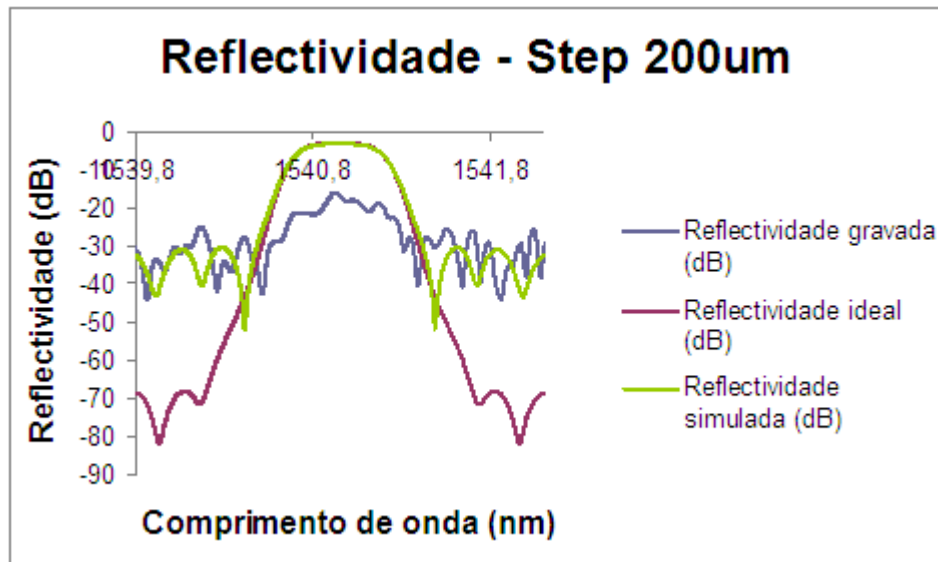


(b)

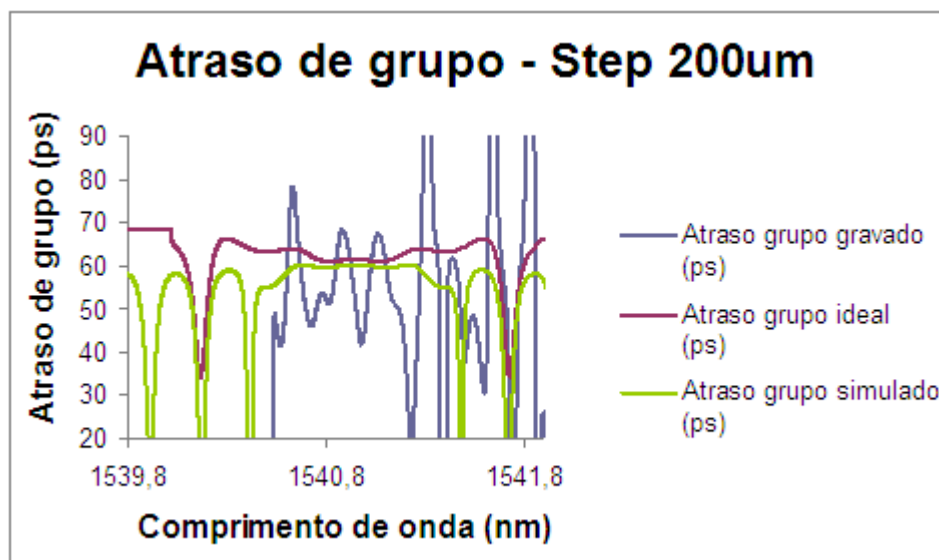
Figura 3.16 – Comparação da resposta espectral da rede gravada com a resposta ideal e simulada para um *Step* de 150 μm . (a) Reflectividade (b) Atraso de grupo

Nota-se o mesmo tipo de comportamento da rede gravada com um *Step* de 90 μm . Na figura 3.16 (b) verifica-se que o ripple na banda de passagem é um pouco maior que a mesma envolvente gravada com 90 μm .

Apresenta-se na figura 3.17 a envolvente gravada com um *Step* de 200 μm .



(a)

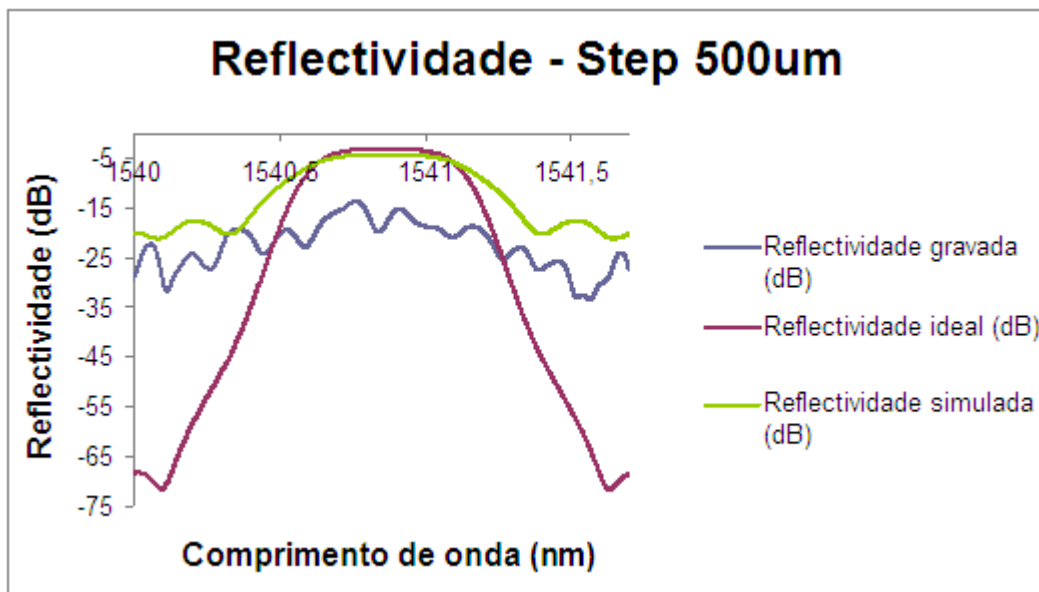


(b)

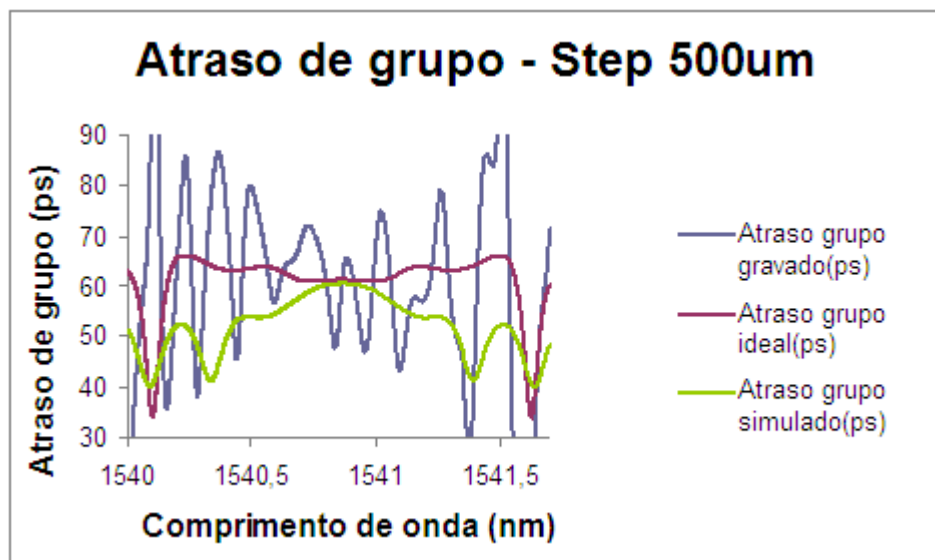
Figura 3.17 – Comparação da resposta espectral da rede gravada com a resposta ideal e simulada para um *Step* de 200 μm . (a) Reflectividade (b) Atraso de grupo

Em termos de atraso de grupo, continua-se a ter o mesmo comportamento, embora, como nos casos anteriores, um ripple superior ao desejado na banda de passagem.

Finalmente, a última gravação da mesma rede, agora com um *Step* de 500 μm .



(a)



(b)

Figura 3.18 – Comparação da resposta espectral da rede gravada com a resposta ideal e simulada para um *Step* de 500 μm . (a) Reflectividade (b) Atraso de grupo

Em termos de reflectividade verifica-se que a resposta da envolvente gravada aproxima-se da simulada. Neste caso, por exemplo, o número de secções da envolvente simulada (M) é de 26, muito inferior aos 400 da envolvente ideal.

Capítulo 4

Conclusões e Trabalho Futuro

Neste trabalho foi estudada a implementação de um sistema que servisse de suporte ao setup de gravação de redes de Bragg. Neste âmbito, o trabalho teve as seguintes fases: estudo teórico das redes de Bragg, desenvolvimento do algoritmo de gravação e posterior simulação, gravação e medição experimental das redes de Bragg.

O estudo teórico iniciou-se no segundo capítulo. Neste capítulo foram estudados os principais tipos de redes de Bragg. Os conceitos expostos permitem fazer a ligação entre as propriedades de uma rede e a respectiva resposta espectral. Ainda neste capítulo foram apresentados diversos processos de gravação de redes de Bragg mais comuns e também o processo que está a ser implementado no Instituto de Telecomunicações – Pólo Aveiro.

No terceiro capítulo desenvolveu-se um algoritmo que serve de apoio à gravação de redes com um complexo perfil de apodização, usando o método de *stitching*. Este algoritmo recebe de entrada uma envolvente, e à saída obtém-se os respectivos *steps* do estágio de translação necessários à gravação da mesma envolvente.

Desenvolveu-se também, um processo de detecção automática de *phase shifts*, que possibilita, caso o utilizador desconheça os *phase shifts* da rede a gravar, a sua obtenção automática, caso a envolvente seja do tipo sinc.

Executado o algoritmo, utilizou-se um simulador baseado no método da matriz de função de transferência, que dá a possibilidade de analisar o efeito do perfil de

apodização, simulando a resposta em termos de reflectividade e atraso de grupo da rede a ser produzida.

Todo este processo está disponível através de uma interface gráfica, também desenvolvida, que carrega a envolvente e gera um ficheiro com a saída. Se se pretender, através desta interface, também é possível obter a simulação da rede a gravar.

É também feito, neste capítulo, uma simulação de um sistema de comunicações ópticas, onde se estudou o impacto do *Step* de gravação no factor Q e se verificou que para *Steps* maiores, este valor decresce devido à consequente degradação (maior ripple) no atraso de grupo associado.

Por fim apresentam-se as respostas espectrais de algumas redes gravadas e a respectiva comparação com a ideal e a simulada anteriormente.

Um dos objectivos deste trabalho é a obtenção do ficheiro de texto com os respectivos *steps* necessários à gravação de uma envolvente. Através da simulação, verifica-se que se obtém uma resposta espectral das redes bastante aceitável, quando comparada com a ideal, e tanto melhor quanto menor for o *Step* de gravação. De referir que neste estudo não foram considerados os erros de posicionamento, a não-linearidade da fotossensibilidade da fibra e o perfil do feixe laser. Conclui-se que as redes obtidas com um *Step* superior têm a sua resposta espectral mais degradada relativamente a uma rede com *Step* inferior, apesar do processo de gravação ser obviamente mais rápido.

A resposta experimental das redes revela diferenças relativamente ao simulado. Existem algumas razões que justificam a diferença: O sistema de gravação ainda está em fase de implementação, pelo que existem ainda algumas instabilidades no sistema que impedem que a visibilidade pretendida seja atingida na gravação. Assim que essa questão, alheia a este trabalho, seja resolvida, espera-se melhorias nos resultados. Por outro lado, a inclusão do efeito da não-uniformidade

do feixe laser, a resposta não-linear da fibra e o erro de posicionamento irão aproximar ainda mais os resultados de simulação dos experimentais. Outras funcionalidades a acrescentar ao software passam por acrescentar a possibilidade de produzir redes aperiódicas.

Apêndice A

Ficheiro Help

Apresenta-se de seguida o ficheiro Help.txt que estará disponível ao utilizador através do botão *Help Load File* na interface gráfica utilizada. Este ficheiro está escrito em inglês para poder ser utilizado por qualquer utilizador.

The text file that you can load when you press the button Load File must have a specific format for the program recognize it:

The file must have two columns separated by a TAB character.

The first column has the z values (in meters) and second column has the v envelope (with normalized units, $0 \leq v \leq 1$).

In the first line you can put deltaneff value. If you do not want give deltaneff value on file, you have to put this value on camp deltaneff.

Before you put the phase shifts you must put the following line in bottom of the two columns in order to separate the information:

99<tab>99

Following that line, put the z values of each phase shift and the phase shifts in the first and second column, respectively.

Example of a text files with deltaneff value, 10 points of the envelope and 3 phase shift:

```
0.00026
1      0
2      0
3      1
4      1
5      2
6      2
7      1
8      1
9      0
```

```
10    0
99    99
3     0.7854
7     1.5708
9     3.1416
```

If you do not want to give the phase shifts values you can compute them using the button Auto-Detect Phase Shift. In this case you do not put the line 99<tab>99.

Example of a text files with 10 points of the envelope and without deltaneff value and any phase shift:

```
1     0
2     0
3     1
4     1
5     2
6     2
7     1
8     1
9     0
10    0
```

To Compute it is necessary give the deltaneff value.

The Simulation button gives the possibility to simulate de envelope using GOSiP.

Apêndice B

Simulador GOSiP

Neste apêndice será descrito o simulador usado para a simulação de redes de Bragg, o GOSiP, *Gratings in OSiP*. [3]

O núcleo do simulador tem como algoritmo base o método da matriz de transferência, explicado na secção 2.4.1. Recorreu-se ao artigo [5] para a implementação deste método.

O GOSiP consiste num conjunto de funções Matlab, que se podem dividir em três conjuntos: funções de pré-análise, simulação da rede e de pós-análise.

O desenvolvimento de uma rede de Bragg só faz sentido se for conhecida a função de transferência do filtro pretendido. Assim, antes de se proceder a uma simulação, é necessário ter-se funções que definam a apodização, visibilidade, aperiodicidade e estruturação. As funções que definem estes parâmetros são `apodFBG`, `visibilityFBG`, `CFBG_estimate` e `superstructure`, respectivamente.

Uma vez definidos os parâmetros da rede, é necessário construir o núcleo de simulação. É isto que a função `Gosip` faz. Esta função usa o método da matriz de função de transferência para todo o tipo de redes, excepto para redes uniformes. São consideradas redes com e sem saltos de fase. Ao primeiro corresponde o *loop* geral. Esta função permite efectuar a filtragem de um sinal de entrada de acordo com a resposta da rede simulada. Caso se pretenda realizar a filtragem à parte, pode-se gravar a resposta espectral da rede e, com a função `FBGfilter`, carregar os dados e filtrar um dado sinal.

Por fim, existem funções de pós-análise para analisar a resposta espectral da rede projectada. É possível determinar a resposta de fase, atraso de grupo, dispersão, largura de banda e frequência central. As funções que realizam estas tarefas são `phasedelaydispersion`, `bandwidthFBG` e `fcentralFBG`, respectivamente. A função `RefractionIndex` devolve os pontos referentes à

variação do índice de refração. Na figura B.1 encontra-se um esquema de todos os blocos constituintes do simulador.

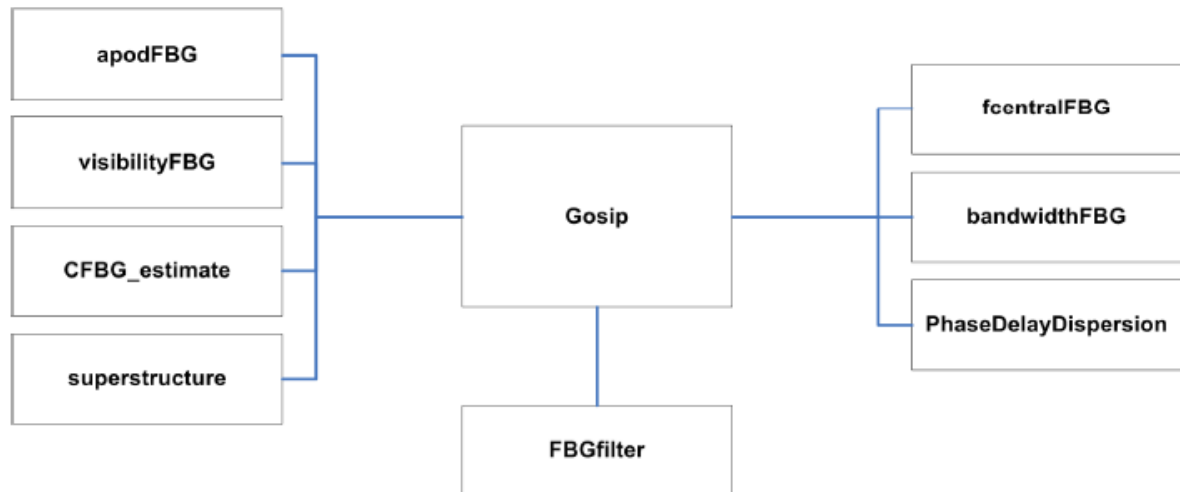


Figura B.1 – Esquema de blocos constituintes do GOSiP

À esquerda temos as funções de pré-análise e à direita as de pós-análise. A função FBGfilter é responsável por fazer a ligação com outro simulador, o OSiP.

Apêndice C

Interface gráfica

No âmbito deste trabalho, foi desenvolvida uma interface gráfica que possibilita ao utilizador, calcular os *steps* aceites pelo mecanismo de gravação de redes de Bragg e fazer a simulação do mesmo.

A interface gráfica foi desenvolvida através do programa Matlab na sua função GUIDE.

Esta interface está dividida em partes distintas.

Premindo o botão *Load file* será aberta uma janela onde o utilizador escolhe o ficheiro de leitura.(Figura C.1)

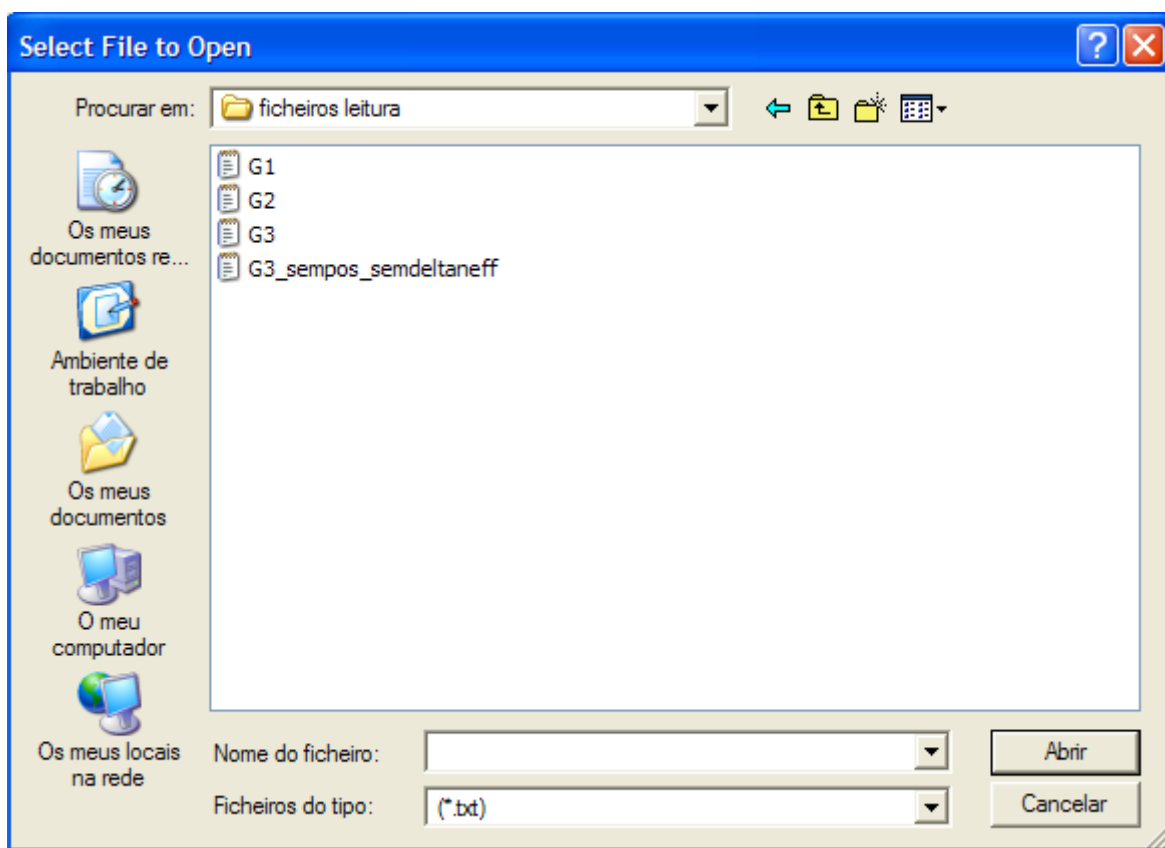


Figura C.1 – Representação da interface gráfica

Está disponível um botão *Help Load File* que permite ao utilizador saber que tipo de ficheiros são lidos pelo botão *Load file*. No Apêndice A encontra-se o ficheiro Help.txt que é aberto quando pressionado o botão *Help Load File*. Na figura C.2, o gráfico que está representado é visível após a leitura do ficheiro. Este gráfico representa a curva da visibilidade em função do comprimento da rede que se pretende gravar.

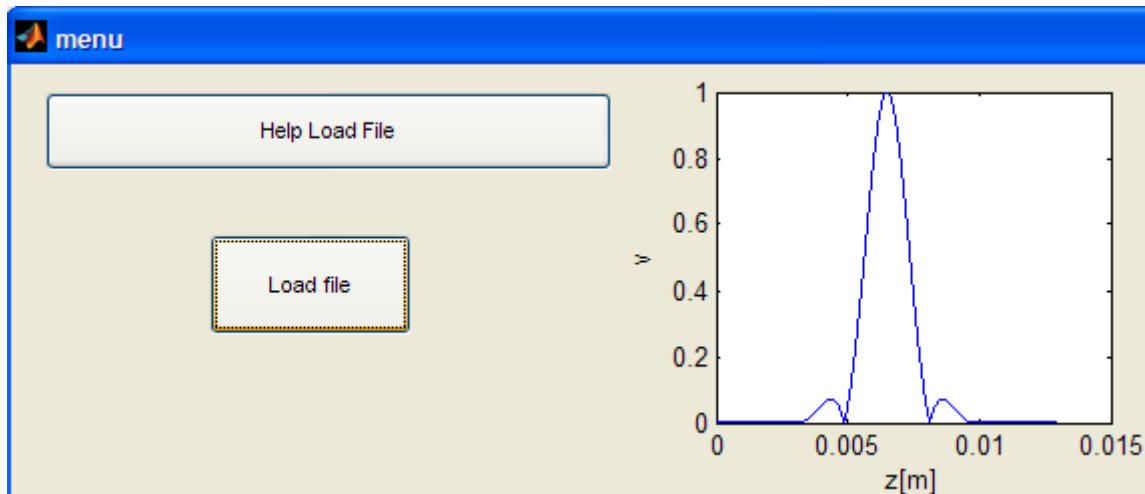


Figura C.2 – Representação da interface gráfica

Na segunda parte o utilizador deverá introduzir alguns parâmetros, nomeadamente o *Step*, *Phase mask period* e *deltaneff*. Há alguns aspectos a ter em conta. O *Step* toma o valor de 100 μm por defeito assim como *Phase mask period* toma o valor 1065 nm, assim, se o utilizador pretender outro valor apenas tem de apagar este e colocar o novo valor nesse campo. O período (Λ) considerado nas diversas expressões tem a seguinte relação com o período da máscara de fase:

$$\Lambda = \frac{\Lambda_{MF}}{2}$$

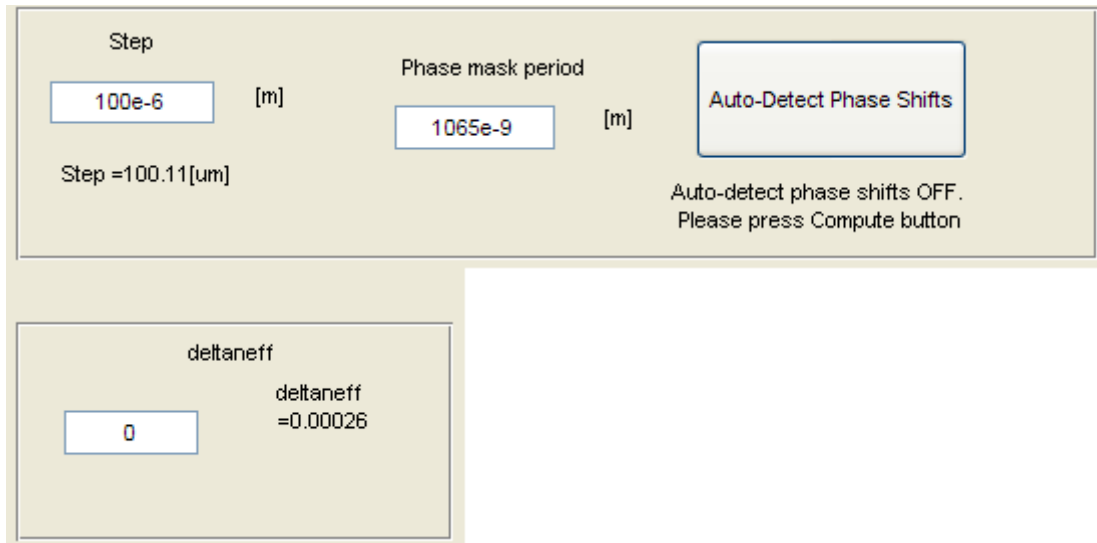


Figura C.3 – Representação da interface gráfica

Como se pode ver pela figura C.3, por baixo do campo *Step* está apresentado o valor mais próximo múltiplo do período.

O botão *Auto-Detect Phase Shifts* permite ao utilizador calcular os pontos de *phase shift* automaticamente caso o pretenda.

O valor de *deltaneff* tem duas opções. Na que está representada na figura C.3 o ficheiro de leitura já tinha o valor de *deltaneff* ($\overline{\delta n_{eff}}$), desta forma o utilizador não necessita de introduzir o valor na caixa de texto ao lado.

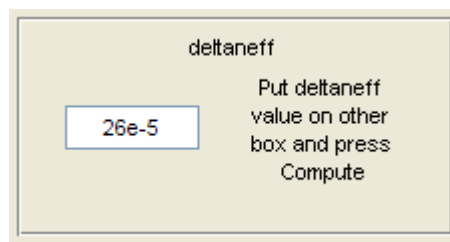


Figura C.4 – Representação da interface gráfica

Na figura C.4 está representada a outra situação. Aqui o utilizador deve introduzir o valor de *deltaneff* na caixa de texto.

Pressionando o botão *Compute* escolhe-se o caminho onde se pretende guardar o ficheiro de saída. (Figura C.5).

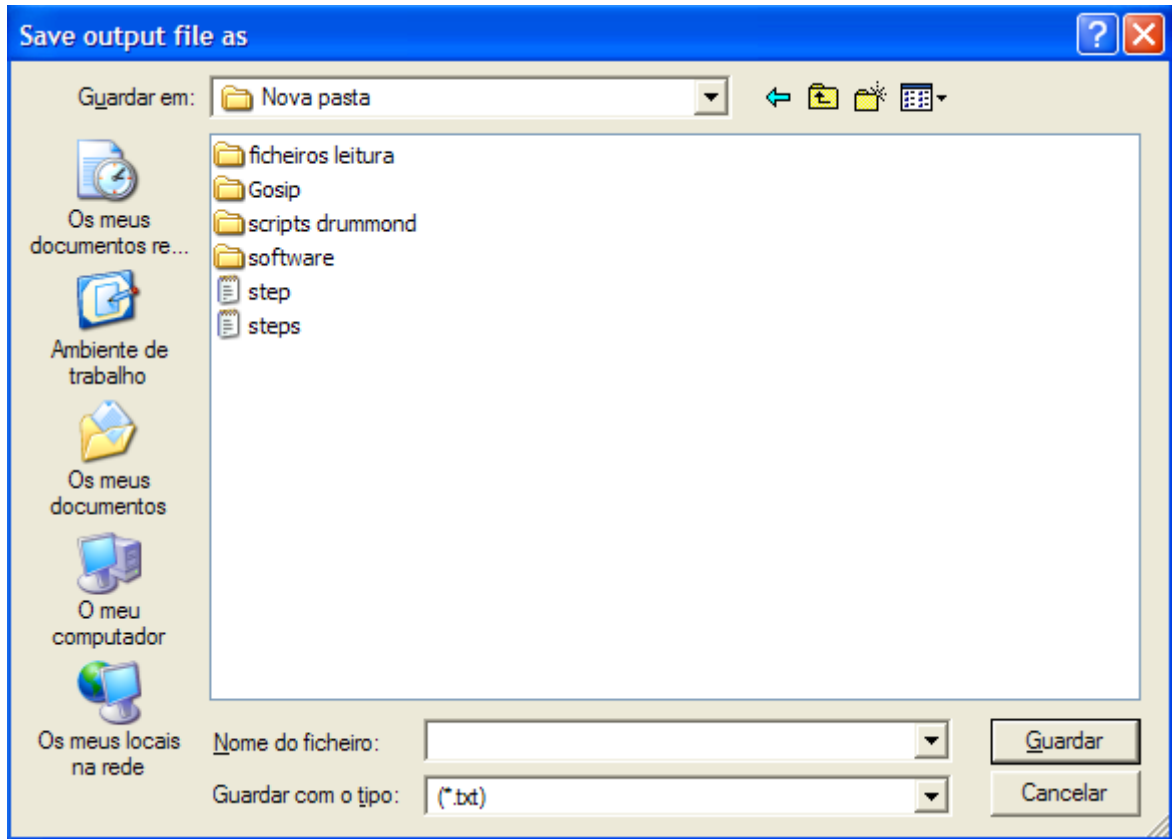


Figura C.5 – Representação da interface gráfica

Este ficheiro, em formato (.txt) apresenta na primeira linha o valor de deltaneff seguido dos *steps* necessários à gravação da rede. No gráfico da figura C.6 é mostrado a azul a envolvente que se deseja gravar e a vermelho está a envolvente de saída, a que realmente vai ser gravada.

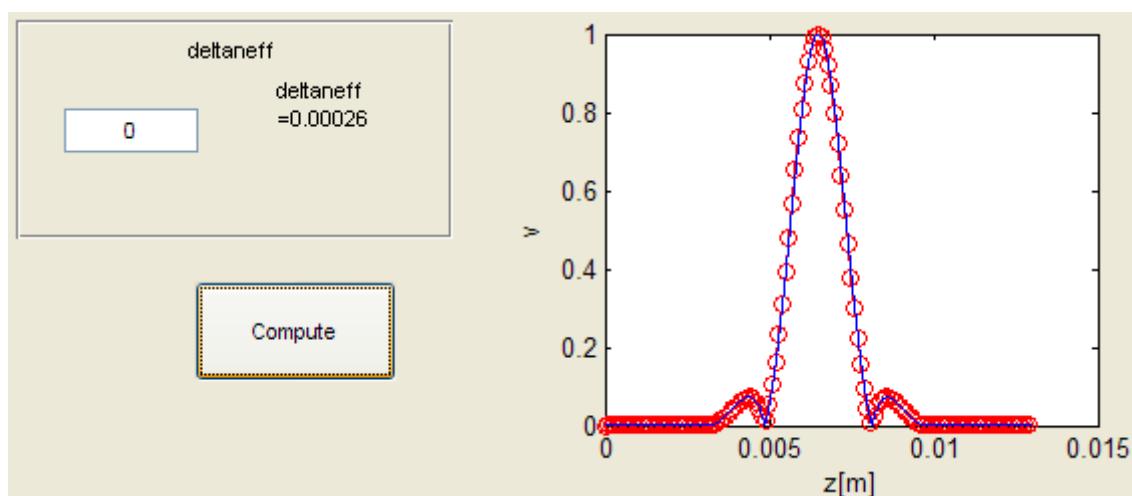


Figura C.6 – Representação da interface gráfica

Apenas falta a parte da simulação. Nesta fase o utilizador apenas deve carregar no botão *Simulation* e serão apresentados os gráficos de reflectividade e atraso de grupo, bem como o valor de M (número de secções em que foi dividida a rede, considerando cada secção como uma rede uniforme). Podemos ver esta descrição na figura C.7.

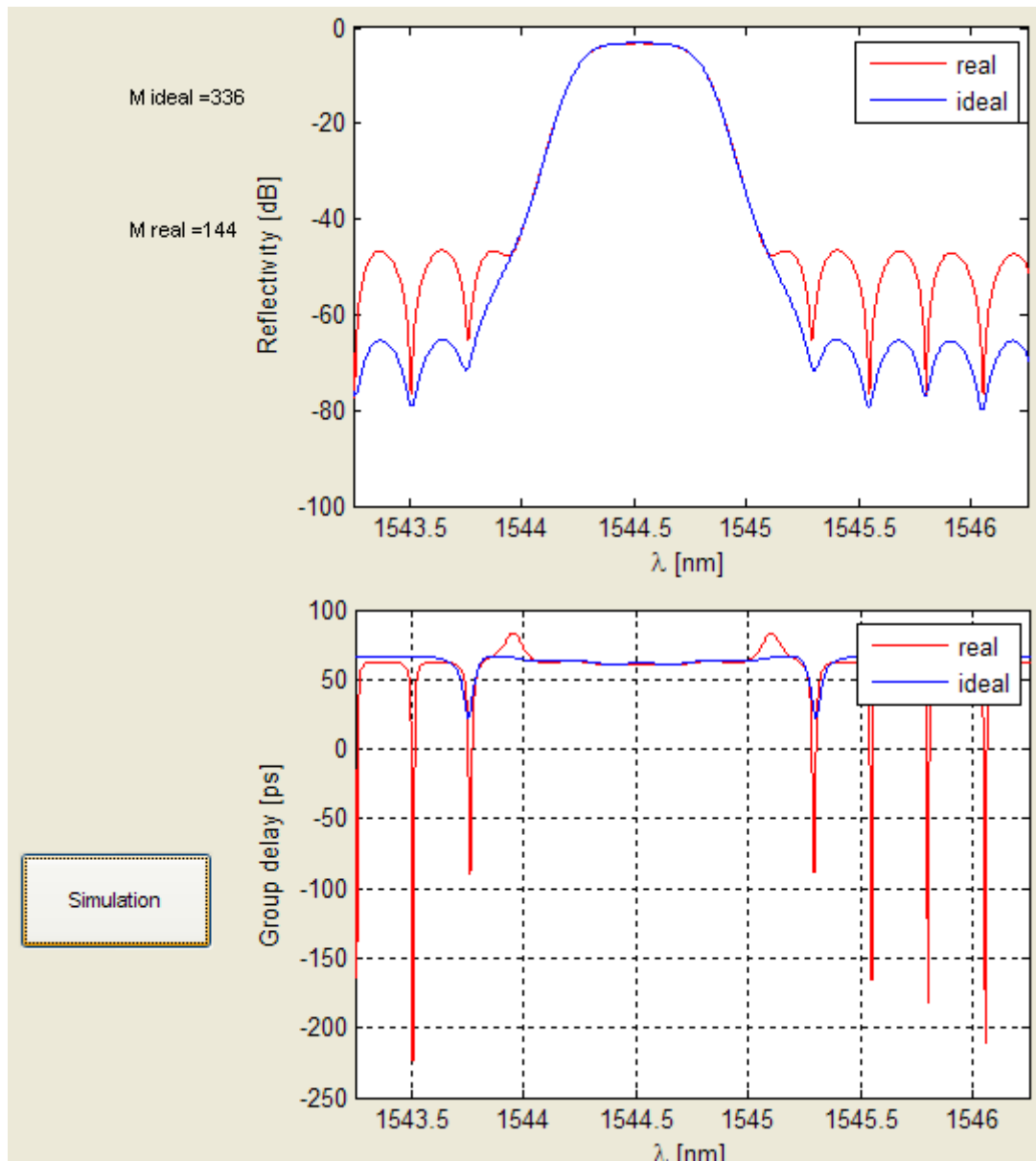


Figura C.7 – Representação da interface gráfica

Bibliografia

[1] Mário J. N.Lima⁽¹⁾, António L. J. Teixeira^(2,1), O. Frazão⁽⁴⁾, Paulo S. B. André⁽³⁾, J. R. Ferreira da Rocha^(2,1). *Redes de Bragg para Telecomunicações*.

⁽¹⁾Instituto de Telecomunicações, Universidade de Aveiro; ⁽²⁾Departamento de Electrónica e Telecomunicações, Universidade de Aveiro; ⁽³⁾Departamento de Física, Universidade de Aveiro, ⁽⁴⁾INESC Porto, Porto.

[2] André Filipe da Costa Vaz. *Controlo e Automação de um processo de gravação de redes de Bragg em fibra óptica*. Projecto de final de curso, Universidade de Aveiro, 2007.

[3] Miguel Vidal Drummond. *Geração de sinais em banda lateral única por filtragem óptica*. Projecto de final de curso, Universidade de Aveiro, 2007.

[4] Rogério Nunes Nogueira. *Redes de Bragg em Fibra óptica*. PhD thesis, Universidade de Aveiro, 2005.

[5] Turan Erdogan. *Fiber grating spectra*. Journal of Lightwave Technology, 15(8):1277-1294, August 1997.

[6] Govind P. Agrawal. *Fiber-optic communication systems*. John Wiley & sons, 3rd edition, 2002.